Praxis der industriellen Durchflussmessung

ABB Instrumentation



Printed in Germany
Layout: ABB Automation Products GmbH
Schutzgebühr 69,– EUR

Praxis der industriellen Durchflussmessung

4. Auflage

Autoren:
F. Frenzel, H. Grothey, C. Habersetzer, M. Hiatt,
W. Hogrefe, M. Kirchner, G. Lütkepohl,
W. Marchewka, U. Mecke, M. Ohm, F. Otto,
K.-H. Rackebrandt, D. Sievert, A. Thöne, H.-J. Wegener

ABB Automation Products, Werk Göttingen

Vorwort

In den vergangenen Jahrzehnten haben sich die Märkte für die Produkte der verfahrenstechnischen Industrie stark verändert. Die Produktion von Massenprodukten hat sich geographisch an die Orte verlagert, in denen Rohstoffe preisgünstig zur Verfügung stehen. Der Wettbewerbsdruck zwingt die Verfahrenstechnik zur Spezialisierung aber auch zur Anpassungsfähigkeit gegenüber Produktänderungen nach Kundenwunsch. Die Anlagen sind so konzipiert, dass Wirtschaftlichkeitsdaten wie z. B. Rohstoffkennwerte, Rohstoffpreise, Chargengrößen kurzfristig in den Ablauf einfließen können. Dabei ist ein wichtiger Gesichtspunkt die Sicherung beziehungsweise die Verbesserung der Qualität.

Der Betrieb solcher Anlagen erfordert einen hohen Grad an Automatisierung. Mit Hilfe der Prozesstechnik kann man die Abläufe so steuern, dass eine Optimierung bei geringem Personaleinsatz möglich wird. Die Prozessleittechnik stellt zudem sicher, dass Prozessabläufe dokumentiert werden und so die Qualität des Produkts nachweisbar bleibt.

Die wichtigste Voraussetzung für die Automatisierung sind die aktuellen Prozessdaten, die durch Messgeräte erfasst werden. Wenn die vom Messwert abhängigen Aktionen die genannten Forderungen erfüllen sollen, müssen diese Angaben natürlich qualitativ hochwertig sein. Deshalb fordert man vom Messgerät:

- gute Genauigkeit
- überschaubare Funktion
- einfache Bedienung und Wartung
- Überprüfbarkeit auch ohne Prüfstand
- Eigenüberwachung
- Fehlersignalisierung
- Kommunikationsfähigkeit

Der Planer einer verfahrenstechnischen Anlage setzt voraus, dass die messtechnischen Fehlergrenzen erfüllt sind. Nicht immer kann er sich von den Problemen freimachen, die die Messstelle mitbringt.

Für den Bereich der Volumen- und Durchflussmessung soll dieses Buch als Hilfestellung für die Geräteauswahl dienen. Es ist den Freunden des Hauses ABB Automation Products gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

Seite

Formelzeichen

A	Fläche, Querschnitt (mm^2, m^2)
B	magnetische Flussdichte, Induktion (T)
b	Breite (mm, m)
C	Durchflusskoeffizient (1)
c	Widerstandsbeiwert (1) (s. Schwebekörper-Durchflussmesser)
c	Schallgeschwindigkeit (m/s)
c	spezifische Wärmekapazität (J/K · kg)
D, d	Durchmesser (mm, m)
E	Vorgeschwindigkeitsfaktor (1) (s. Wirkdruckmessung)
E	Energie (J, KWh)
e	Energiehöhe (als Niveauhöhe ausgedrückte kinetische Energie) (m)
F	Kraft (N, kg · m/s^2)
f	Frequenz (s^{-1})
g	Fallbeschleunigung = 9,81 m/s^2
H	Energiehöhe (als Niveauhöhe ausgedrückte kinetische Energie) (m)
h	Höhe, Höhenstand, Niveau (mm, m)
J	elektrische Stromstärke (A)
k	Wandrauheit (mm)
l	Länge (mm, m)
m	Masse (g, kg)
m	Öffnungsverhältnis d^2/D^2 (1) (s. Wirkdruckmessung)
p	Druck (Pa, bar), P_{dyn} = dynamischer Druck
Δp	Druckdifferenz, Wirkdruck (Pa, bar)
q_m	Massestrom, Massedurchfluss (g/s, kg/h)
q_Q	Wärmestrom (J/s)
q_v	Volumenstrom, Volumendurchfluss (l/s, m^3/h)
T	Temperatur (K, °C)
T	Zeitkonstante (s)

t Zeit (s)

U elektrische Spannung (V)

V Volumen (mm^3, m^3, l)

v Geschwindigkeit (m/s)

W Wertigkeit (1) (s. magn.-induktive Durchflussmesser)

β Durchflussmesserverhältnis d/D ;1< (s. Wirkdruckmessung)

γ thermischer Volumenausdehnungskoeffizient (K^{-1})

Δ Differenz, spez. Druckdifferenz Δp

ε Expansionszahl (1)

η dynamische Viskosität (Pa · s)

χ elektrische Leitfähigkeit (S/cm)

λ Widerstandsbeiwert, Reibungskoeffizient (1) (s. Freispiegelmessung)

μ Überfallkoeffizient (1) (s. Messwehr)

ν kinematische Viskosität (m^2/s)

ρ Dichte (kg/m^3, g/cm^3)

Φ magnetischer Fluss (Wb, Vs)

ω Winkelgeschwindigkeit (s^{-1})

Fr Froudesche Zahl (1)

Re Reynoldsche Zahl (1)

St Strouhal-Zahl (1)

VUZ Viskositäts-Unabhängigkeits-Zahl (1)

1 Einführung in die Physik der Durchfluss- und Mengenmessung

1.1 Messgrößen

Die Messtechnik schafft die Voraussetzungen für die Optimierung von Produktionsabläufen und Dosiervorgängen. Neben der Druck- und Temperaturmessung gehört die Durchflussmessung zu den wichtigsten Messgrößen. Erst die quantitative Ermittlung von Mengen, Volumina und Durchflüssen gestattet die Beeinflussung der Produktionsprozesse durch Steuerungen und Regelungen.

Die wichtigsten Basisgrößen sind Masse und Volumen:

Masse mit dem Formelzeichen m gemessen in kg oder g
Volumen mit dem Formelzeichen V gemessen in m^3, dm^3 oder cm^3

Als Quotient aus Masse und Volumen gibt die **Dichte** die Beziehungen der beiden

Größen an:

$$\text{Dichte} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}} : \rho = \frac{m}{V} \left[\frac{kg}{dm^3}, \frac{kg}{m^3}, \frac{g}{cm^3}\right]$$

Da die meisten Produktionsanlagen kontinuierlich arbeiten, werden Messwerte gefordert, die den augenblicklichen Zustand oder den Momentanwert angeben. Deshalb ist eine zeitabhängige Größe erforderlich, nämlich der Durchfluss. Bezogen auf die beiden Basisgrößen Masse und Volumen unterscheidet man den **Massedurchfluss q_m** und den **Volumendurchfluss q_v**.

$$\text{Massedurchfluss} = \frac{\text{Masse}}{\text{Zeit}} : q_m = \frac{m}{t} \left[\frac{kg}{s}, \frac{g}{s}, \frac{kg}{h}\right]$$

$$\text{Volumendurchfluss} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Zeit}} : q_v = \frac{V}{t} \left[\frac{m^3}{s}, \frac{l}{s}, \frac{m^3}{h}\right]$$

Wegen der Unabhängigkeit von Druck und Temperatur ist die Massedurchflussmessung die ideale Methode, während die Volumendurchflussmessung in der Regel gerätetechnisch günstiger ist und deshalb bevorzugt wird.

Die Volumina der inkompressiblen Flüssigkeiten werden in den üblichen Druckbereichen vom Druck selbst nicht fühlbar beeinflusst. Wenn dagegen die Temperatur wechselt, kommt es zur Volumenänderung, die unter Umständen Korrekturrechnungen erfordert.

Das korrigierte Volumen V_2 ist dann:

$$V_2 = V_1 (1 + \gamma \cdot \Delta T) \tag{1.1}$$

γ [K^{-1}] : Thermischer Volumen-Ausdehnungskoeffizient (spez. Stoffkonstante)
T [K] : Temperatur

Heute sind die Durchflussmesser mit Verstärkern ausgerüstet, die derartige Korrekturrechungen für den Durchfluss analog zu V_2 durchführen. Erheblich größer sind die Einflüsse von Druck und Temperatur bei der Gasmessung. Deshalb werden die Messwerte meistens auf dem Normzustand bezogen, nämlich auf p_n = 101325 Pa oder 1,01325 bar und T_n = 273 K.

Das **Normvolumen** v_n ist dann:

$$V_n = V \cdot \frac{273}{273 + T} \cdot \frac{1{,}013 + T}{1{,}013} \tag{1.2}$$

V = Betriebsvolumen in m³
T = Betriebstemperatur in °C
p = Betriebsdruck in bar

Selbstverständlich können derartige Umrechnungen bezogen auf den Volumendurchfluss im **Normzustand** $(q_v)_n$ in entsprechenden Recheneinrichtungen durchgeführt werden.

Der Durchfluss als zeitbezogene Größe meldet den Augenblickszustand in der Rohrleitung. Er ist keine Aussage über die Masse oder das Volumen, d. h. über die Gesamtmenge. Um diesen Wert zu ermitteln, bedarf es der Integration:

$$V = \int_{t_1}^{t_2} q_v \cdot dt \tag{1.3a}$$

oder

$$m = \int_{t_1}^{t_2} q_m \cdot dt \tag{1.3b}$$

Der Durchfluss vollzieht sich in der Gegenwart, während Volumen oder Masse die Vergangenheit darstellen.

1.2 Begriffe aus der Strömungslehre

1.2.1 Viskosität

Die **Viskosität** oder **Zähigkeit** einer Flüssigkeit kennzeichnet deren Vermögen, gegen Formänderungen Widerstand zu leisten. Die Ursache dafür ist die innere Reibung in der Flüssigkeit als Folge der Kraftwirkung zwischen den Molekülen. Da die Molekularbewegungen ein Temperaturkriterium darstellen, ist die Viskosität temperaturabhängig. Die dynamische Viskosität η in Pa.s ist folgendermaßen definiert: 1 Pascalsekunde ist gleich der dynamischen Viskosität eines laminar strömenden, homogenen Fluids, in dem zwischen zwei ebenen, parallel im Abstand 1 m angeordneten Schichten mit dem Geschwindigkeitsunterschied 1 m/s die Schubspannung 1 Pa herrscht.

Die kinematische Viskosität ν wird auch als dichtebezogene Viskosität bezeichnet und in m^2/s gemessen:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \left[\frac{Pa \cdot s \cdot m^3}{kg} = \frac{m^2}{s} \right] \qquad (1.4)$$

Die Stoffeigenschaft **Viskosität** gibt es natürlich auch bei Gasen. Die Werte sind erheblich kleiner als bei Flüssigkeiten, sie steigen mit der Temperatur.

1.2.2 Reynoldsche Zahl

Die Reynoldsche Zahl Re ist eine Kennzahl der Ähnlichkeitsmechanik. Sie ermöglicht es, die mit einer bestimmten strömenden Flüssigkeit erzielten Messergebnisse auf Flüssigkeiten anderer Zähigkeit und Dichte bei ähnlichen geometrischen Verhältnissen zu übertragen.

$$Re = \frac{d \cdot v}{\nu} \; [1] \qquad (1.5)$$

d: Rohrdurchmesser in m
v: mittlere Fließgeschwindigkeit in m/s:
ν: kinematische Zähigkeit in m^2/s

1.2.3 Strömungsarten

Bei kleiner Fließgeschwindigkeit und großer Viskosität strömt die Flüssigkeit schichtförmig, das heißt, dass die Flüssigkeitsteilchen sich auf wohl geordneten nebeneinander hergleitenden Schichten bewegen. Man spricht von **laminarer Strömung**, in der sich die Schichten nicht miteinander vermischen.

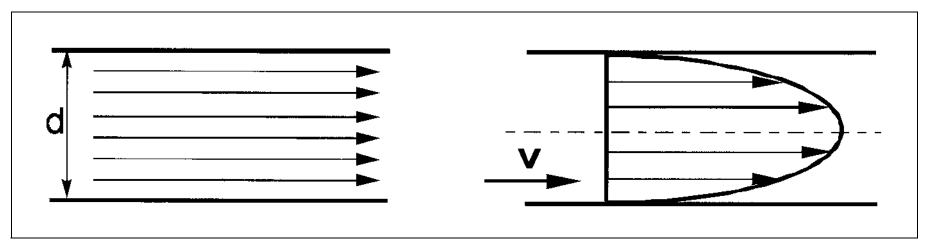


Bild 1-1: Laminare Strömung Geschwindigkeitsprofil

Die Geschwindigkeitsverteilung zeigt, dass die Reibungskräfte der ruhenden Rohrwand den stärksten bremsenden Einfluss ausüben und dass von Schicht zu Schicht die Geschwindigkeit wächst und in der Rohrmitte den größten Wert erreicht.

Wird die Fließgeschwindigkeit erhöht oder die Viskosität herabgesetzt, so überlagert sich die axial gerichtete Bewegung an allen Stellen mit Zusatzbewegungen, die regellos allseitig verlaufen und die Strombahnen gegenseitig beeinflussen, so dass ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil entsteht. Das ist die **turbulente Strömung**. In der wandnahen Zone bildet sich eine Grenzschicht, in der die Flüssigkeit von null auf v beschleunigt werden muss, weil sie durch Adhäsion an der Wand haftet. Deshalb ist das Geschwindigkeitsprofil außen unstetig.

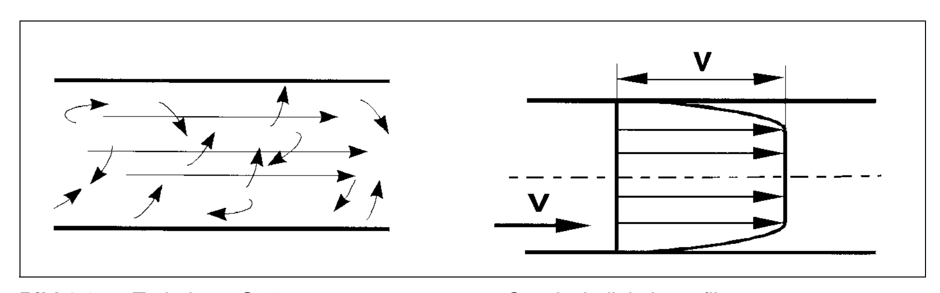


Bild 1-2: Turbulente Strömung Geschwindigkeitsprofil

Als Beurteilungskriterien für die Strömungsart dient die Reynoldsche Zahl Re, denn sie enthält die entscheidenden Faktoren v und ν.

Die kritische Reynoldsche Zahl Re_{Kr} gibt mit einer guten Genauigkeit den Umschlagpunkt an:

$$Re_{Kr} \sim 2300$$

Eigenschaften der Strömung	Re < 2300	Re > 2300
Strömungsart	laminar	turbulent
Druckverlust in Leitung, Messgerät	klein	erheblich
Geschwindigkeitsprofil	parabolisch	annähernd rechteckig
Verhältnis des Mittelwertes der Strömungsgeschwindigkeit zur größten Geschwindigkeit in der Rohrmitte	0,5	0,8...0,9

Tab. 1-1: Strömungseinflüsse

Unter idealen Verhältnissen kann der Umschlagpunkt bei einem höheren Re-Wert liegen. Dieser dann labile Zustand schlägt bei geringstem Anlass, z. B. durch Strömungsstörer, in den stabilen turbulenten Zustand um.

Fast alle Messgeräte für Durchfluss arbeiten mit Fließgeschwindigkeiten, die im Bereich der turbulenten Strömung liegen.

1.2.4 Strömungsablösungen

Wie bereits erwähnt, entsteht an der strömungsbegrenzenden Wand eine Grenzschicht, in der die Fließgeschwindigkeit von null auf v ansteigt. Ein erhabenes Hindernis in der Wand verlängert die Grenzschichtzone und verzögert die wandnahe Flüssigkeit noch stärker, so dass hinter dem Hindernis ein Totraum mit einem leichten Unterdruck entsteht. Aus dem Raum mit der höheren Geschwindigkeit strömt die Flüssigkeit in diesen Totraum, es bilden sich Wirbel.

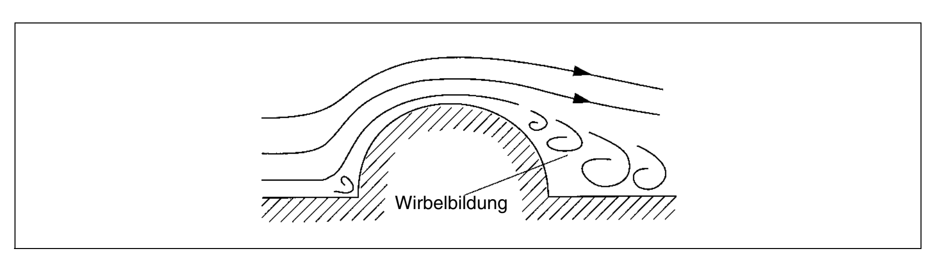


Bild 1-3: Totraum mit Wirbelbildung

Die Strömung löst sich von der Wandoberfläche ab. Beispielhafte Darstellungen dazu in Bild 1-4 und Bild 1-5. In der Messtechnik sind Wirbel unerwünscht, weil sie Energie benötigen, die sie dem strömenden Stoff entnehmen und somit Druckverluste verursachen. Außerdem verändern sich die Geschwindigkeitsprofile so stark, dass viele Durchflussmessverfahren nicht funktionieren.

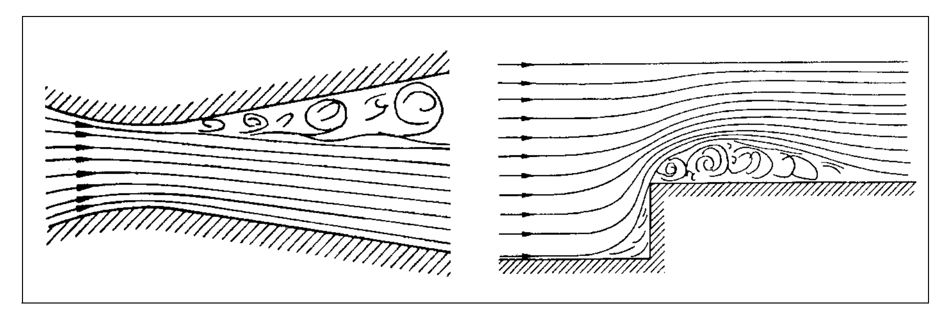


Bild 1-4: Strömungsablösungen bei Erweiterung

Bild 1-5: Strömungsablösung hinter einer scharfen Kante

In Bild 1-6 und Bild 1-7 wird beispielhaft dargestellt, wie sich die Strömungsprofile nach Rohrleitungsstörern ausbilden.

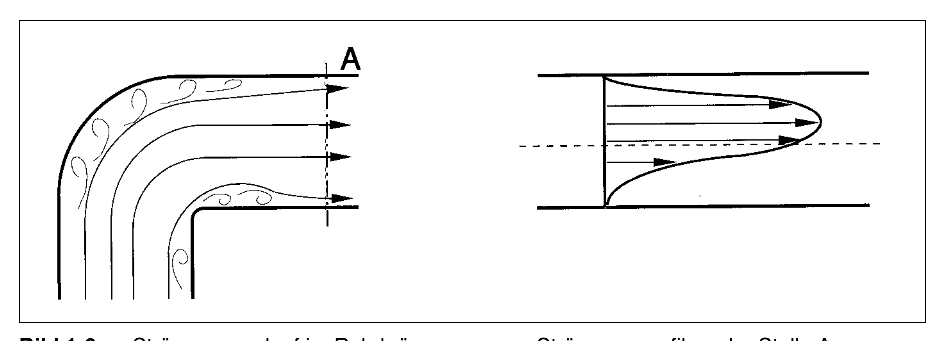


Bild 1-6: Strömungsverlauf im Rohrkrümmer — Strömungsprofil an der Stelle A

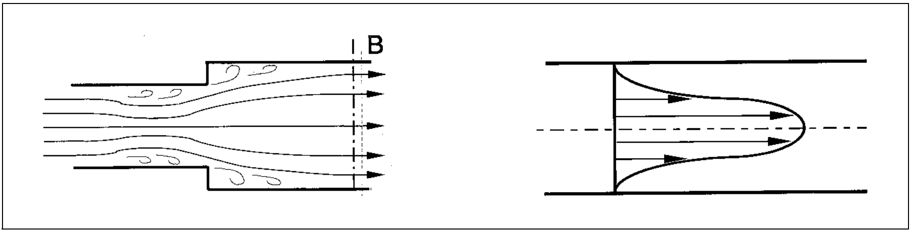


Bild 1-7: Strömungsverlauf bei sprungförmiger Erweiterung — Strömungsprofil an der Stelle B

Wird ein Störkörper mitten in den Stoffstrom gebracht, so entsteht die Strömungsablösung und die Wirbelbildung beidseitig. Dabei ist es interessant, dass nach der einseitigen Ausbildung eines Wirbels auf der Gegenseite ein gleicher entsteht, der den ersten zur Ablösung zwingt.

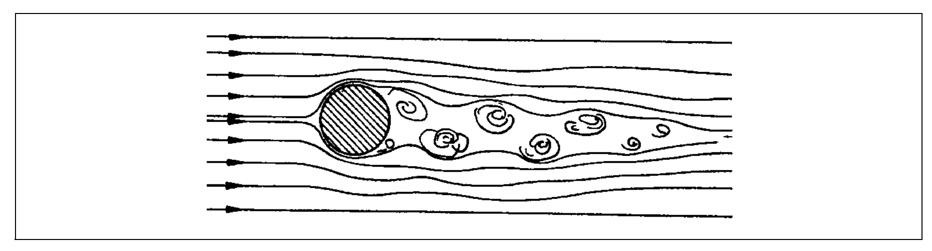


Bild 1-8: Karmansche Wirbelstraße

So entstehen in periodischer Folge wechselseitig abströmende Wirbel in der nach seinem Entdecker Karman benannten Wirbelstraße. Die sonst unerwünschten Wirbel werden im Wirbel-Durchflussmesser als Messeffekt genutzt.

1.2.5 Energiegleichung und Durchfluss

In einem strömenden Stoff (Flüssigkeit oder Gas) wirken folgende Energieformen:

potenzielle Energie { Energie der Lage, Druckenergie }

kinetische Energie

(Weitere Energieformen, z. B. elektrische, chemische, sind an dieser Stelle bedeutungslos). Es sind

Energie der Lage:	$m \cdot g \cdot h$	m = Masse g = Fallgeschwindigkeit
Druckenergie:	$m \cdot \frac{p}{\rho}$	h = Höhe p = statischer Druck
kinetische Energie:	$m \cdot \frac{v^2}{2}$	ρ = Dichte v = Fließgeschwindigkeit

Ihre Summe ist dann:

$$E = m \cdot g \cdot h + m \cdot \frac{p}{\rho} + m \cdot \frac{v^2}{2} \qquad (1.6)$$

In seinem Energieerhaltungssatz sagt **Bernoulli**, dass die Summe der Energien an jedem Ort des Strömungsweges konstant ist (bei den kompressiblen Gasen muss die Expansion berücksichtigt werden), wenn nicht Energie zu- oder abgeführt wird. Bezogen auf den Massenstrom q_m ergibt sich dann:

$$g \cdot h + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = const \qquad (1.7)$$

Ausgehend davon, dass die Lageenergie wegen der relativ geringen Niveauunterschiede in Rohrleitungen bedeutungslos ist, vereinfacht sich diese Formel:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = const \qquad (1.8)$$

Oder beim Vergleich von zwei Bezugspunkten (Bild 1-9):

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \qquad (1.9)$$

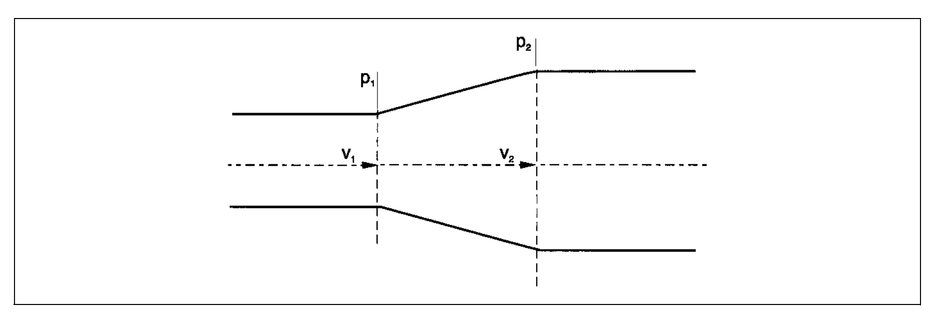


Bild 1-9: Rohrleitungserweiterung

Mit der Umgestaltung der Gleichung (1.9) entsteht die Basis-Gleichung für die Wirkdruckmessung:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}(v_2^2 - v_1^2) \qquad (1.10)$$

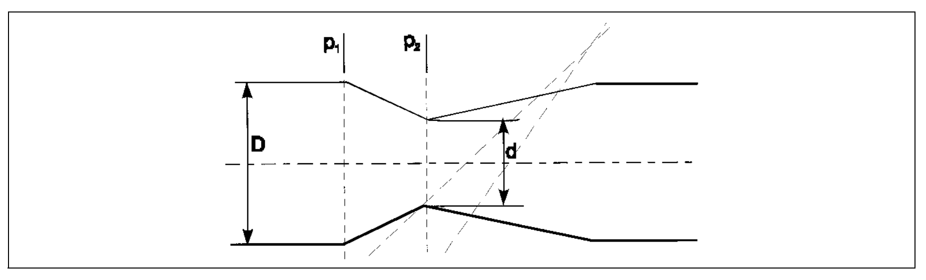


Bild 1-10: Rohreinschnürung

Die Rohreinschnürung in Bild 1-10 setzt einem Durchfluss q_v zwei Öffnungsquerschnitte bei den Durchmessern D und d entgegen.

$$q_v = v \frac{D^2 \pi}{4} = v \cdot A \tag{1.11}$$

Nach dem Kontinuitätsgesetz strömt durch jeden Querschnitt in der gleichen Zeit gleich viel Masse, bei der inkompressiblen Flüssigkeit also der gleiche Durchfluss:

$$q_v = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$$
$$q_v = v_1 \frac{D^2 \pi}{4} = v_2 \cdot \frac{d^2 \pi}{4} \tag{1.12}$$
$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{d}{D}\right)^2$$

Mit dem Öffnungsverhältnis m als neu eingeführten Begriff ergibt sich

$$m = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \tag{1.13a}$$

$$m = \frac{v_1}{v_2}$$
$$v_1 = m \cdot v_2 \tag{1.13b}$$

eingesetzt in Gleichung (1.10):

$$\Delta p = \frac{\rho}{2}\left(v_2^2 - m^2 v_2^2\right) = \frac{\rho}{2} v_2^2 \left(1 - m^2\right) \tag{1.14}$$

v_2 wird ersetzt durch

$$v_2 = \frac{q_v}{A_2} \qquad \text{aus (1.11)}$$

$$\Delta p = \frac{q_v^2}{A_2^2} \cdot \frac{\rho}{2} (1 - m^2) \qquad (1.15)$$

Daraus ergibt sich für den Durchfluss

$$q_v = A_2 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho(1 - m^2)}} \qquad (1.16)$$

Eine Einschnürung des Strömungsquerschnittes verursacht also eine Steigerung der Fließgeschwindigkeit und eine Abnahme des statischen Druckes. Der Druckabfall ist der Wirkdruck Δp, er ist dem Quadrat des Durchflusses proportional.

$$q_v^2 \sim \Delta p$$
$$q_v \sim \sqrt{\Delta p} \qquad (1.17)$$

Wenn in einer Strömung die Geschwindigkeit durch ein Hindernis auf Null abgestoppt wird, so entsteht an dieser Stelle eine Druckerhöhung, indem kinetische Energie in Druck umgesetzt wird.

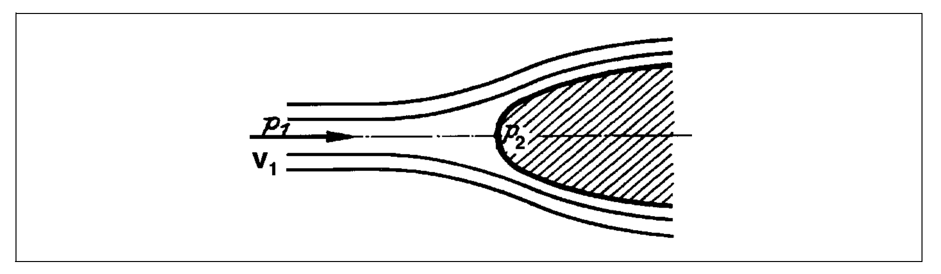


Bild 1-11: Staukörper

Im Mittelpunkt des Störers, dem **Staupunkt**, ist dann:

$$v_2 = 0$$

Aus Gleichung (1.9) folgt:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{0^2}{2}$$

$$p_2 = p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \qquad (1.18)$$

Der Gesamtdruck p_2 am Staupunkt ist somit die Summe aus dem statischen Druck p_1 und dem umgewandelten dynamischen Druck $P_{dyn} = \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2$.

Wenn also die beiden Druckwerte bekannt sind, lässt sich die Fließgeschwindigkeit und damit der Druck errechnen:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_2 - p_1)} \qquad (1.19)$$

Bei der **Staudruckmessung** hat man diesen Zusammenhang zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit genutzt.

1.2.6 Hydraulik der Gerinne

Strömung in offenen Gerinnen

Betrachtet man bei einer Strömung (Bild 1-12) im Querschnitt A unter der Voraussetzung der gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung und unter Vernachlässigung der Reibung die Energieverhältnisse nach Bernoulli, so addieren sich die Energie der geodätischen Höhe h, die des Druckes p und die der Geschwindigkeit v.

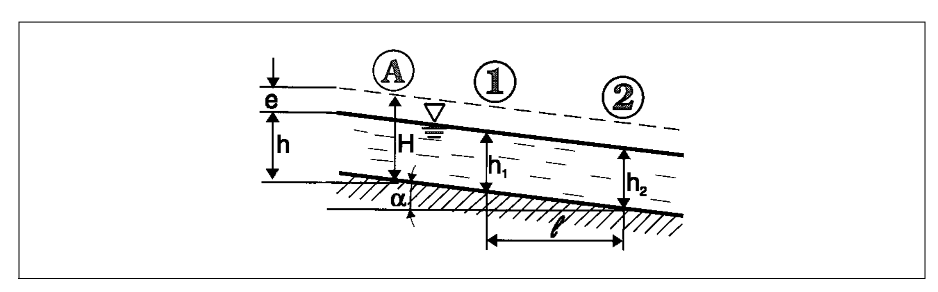


Bild 1-12: Offene Gerinne mit Gefälle

$$E = m \cdot g \cdot h + m \cdot \frac{p}{\rho} + m \cdot \frac{v^2}{2} \qquad (1.6)$$

Vernachlässigt man den atmosphärischen Druck, weil er als unveränderliche Größe die Betrachtung nicht beeinflusst, und drückt man die Energiegrössen in Flüssigkeitshöhenangaben aus, so ergibt sich:

$$H = h + \frac{v^2}{2g} = h + e \tag{1.20}$$

Der Ausdruck $e = \frac{v^2}{2g}$ symbolisiert als Höhenangabe die Umwandlung der kinetischen in Lageenergie. Der Kurvenzug bei e ist die Energielinie.

Nach dem Kontinuitätsgesetz müssen die Energieinhalte an den Punkten 1 und 2 gleich sein:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \tag{1.21}$$

Zur Untersuchung der Strömungsverhältnisse bei unterschiedlichem Gefälle wird der Höhenstandsunterschied eingerechnet:

$$h_1 + l \cdot \tan\alpha + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \tag{1.22a}$$

$$h_2 - h_1 - \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} = l \cdot \tan\alpha \tag{1.22b}$$

Nach einigen Vereinfachungen und algebraischen Umwandlungen steht die die Aussage für das Gefälle an der Wasseroberfläche im rechteckigen Querschnitt:

$$\frac{h_2 - h_1}{l} \approx \frac{\tan\alpha}{1 - \frac{v^2}{g \cdot h}} \tag{1.23}$$

Mit $v = \sqrt{g \cdot h}$ wird eine bemerkenswerte Grenzgeschwindigkeit v_{gr} erreicht, nämlich die Schwallgeschwindigkeit. Sie ist identisch mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit flacher Wellen. Betrachtet man die Gleichung 1.23 bei v_{gr}, so wird der Term

$$1 - \frac{v^2}{g \cdot h} = 0$$

Für das Gefälle

$$\frac{h_2 - h_1}{l} = \infty$$

bedeutet das, dass es unter Idealbedingungen (z. B. reibungsfrei) unendlich groß ist. Als Beurteilungskriterium dient die **Froudesche Zahl** Fr.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (1.24)$$

(Fr symbolisiert das Verhältnis von Trägheits- zu Schwerkraftwirkung. Gleichung 1.24 gilt für den Spezialfall des Rechteckquerschnitts).

Bei **Schwallgeschwindigkeit** v_{gr} hat Fr die Größe 1. Im Zustand der Schwallgeschwindigkeit bleibt eine Welle stehen, kann weder flussaufwärts noch flussabwärts wandern.

Wenn die Geschwindigkeit kleiner ist als v_{gr} bezeichnet man die Flüssigkeitsbewegung als **Strömen**. Wellen können stromaufwärts laufen, also Störungen durch z. B. Einbauten machen sich vor der Störungsstelle bemerkbar.

Bei größerer Geschwindigkeit als v_{gr} spricht man vom **Schießen**. In diesem Fall wirken Störungen stromabwärts, Wellen können nicht stromaufwärts laufen.

Strömungsart	$e = \frac{v^2}{2g}$	Abfluss	Froudesche Zahl	Geschwindigkeit	Geschwindigkeitsenergie
Schwall		gleichförmig	Fr =1	$v = \sqrt{g \cdot h}$	$\frac{v^2}{2g} \Rightarrow$ gleichbleibend
Strömen		verzögert	Fr < 1	$v < \sqrt{g \cdot h}$	$\frac{v^2}{2g} \Rightarrow$ abnehmend
Schießen		beschleunigt	Fr > 1	$v > \sqrt{g \cdot h}$	$\frac{v^2}{2g} \Rightarrow$ zunehmend

Tab. 1-2: Strömung und Gefälle

Übergang vom Strömen zum Schießen

Wenn die strömend fließende Flüssigkeit beschleunigt wird, kann es zum Schießen kommen, ein Zustand, der durchaus gewollt ist, um unerwünschte zurücklaufende Wellen zu vermeiden. Das ist beispielsweise beim Venturikanal der Fall.

Bild 1-13 zeigt zwei Beispiele:

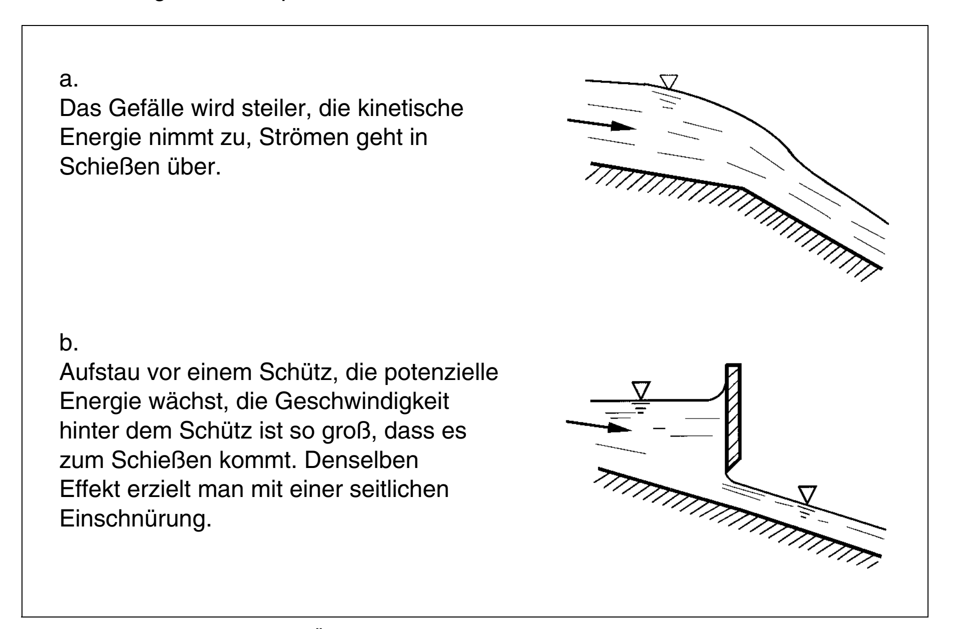


Bild 1-13: Beschleunigender Übergang

Übergang vom Schießen zum Strömen

Der große Anteil an kinetischer Energie der schießenden Flüssigkeit muss verringert werden, wenn der Zustand des Strömens eintreten soll. Die Fließgeschwindigkeit ist dann geringer, der Wasserspiegel steigt an. Im strömenden Zustand entsteht eine Welle, die stromauflaufend sehr viel Energie in Wärme umwandelt.

Schließlich sind die Geschwindigkeiten des schießenden Abflusses und der Wellenfortpflanzung gleich, die Welle kommt mit der Schwallgeschwindigkeit zum Stehen. Man spricht vom **Wechselsprung**, der oft an einer Störungsstelle entsteht und sich dort stabilisiert.

a)
Das Gefälle nimmt spontan ab, der Flüssigkeitsspiegel steigt an, es entsteht im Wechselsprung die energievernichtende Deckwalze.

b)
Ein ähnlicher Effekt tritt auf bei einer positiven Stufe, die ihrerseits zusätzliche Energie fordert.

c)
Ein Sonderfall ist der rückgestaute Wechselsprung hinter einem Schütz, wenn der Spiegel dahinter hoch ist. Die Deckwalze bildet sich als unsichtbarer Sprung aus.

Bild 1-14: Wechselsprung

Abfluss aus großen Öffnungen, Überfälle

Rechteckiger Überfall

Beim reibungslosen Ausfluss aus einem offenen Behälter wird nach Bernoulli die gesamte verfügbare Energie in kinetische umgesetzt.

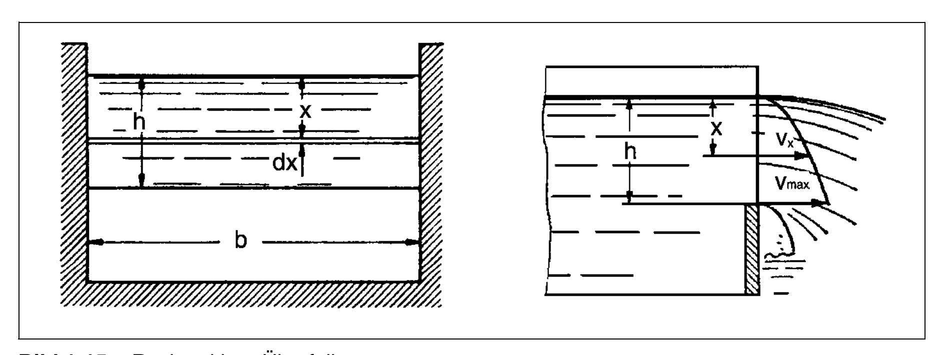


Bild 1-15: Rechteckiger Überfall

In der Tiefe x herrscht demnach die Ausflussgeschwindigkeit.

$$v_x = \sqrt{2g \cdot x}$$

Durch ein Flächenelement $A_x = b \cdot dx$ tritt der Durchfluss
$q_{vx} = A_x \cdot v_x$ aus:

$$q_{vx} = b \cdot dx \cdot \sqrt{2g \cdot x} \tag{1.25}$$

Für die ganze Öffnung gilt dann:

$$q_v = \int_0^h b \cdot \sqrt{2g \cdot x}\ dx \tag{1.26a}$$

$$q_v = \frac{2}{3} \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2g \cdot h}$$
$$q_v = \frac{2}{3} \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \tag{1.26b}$$

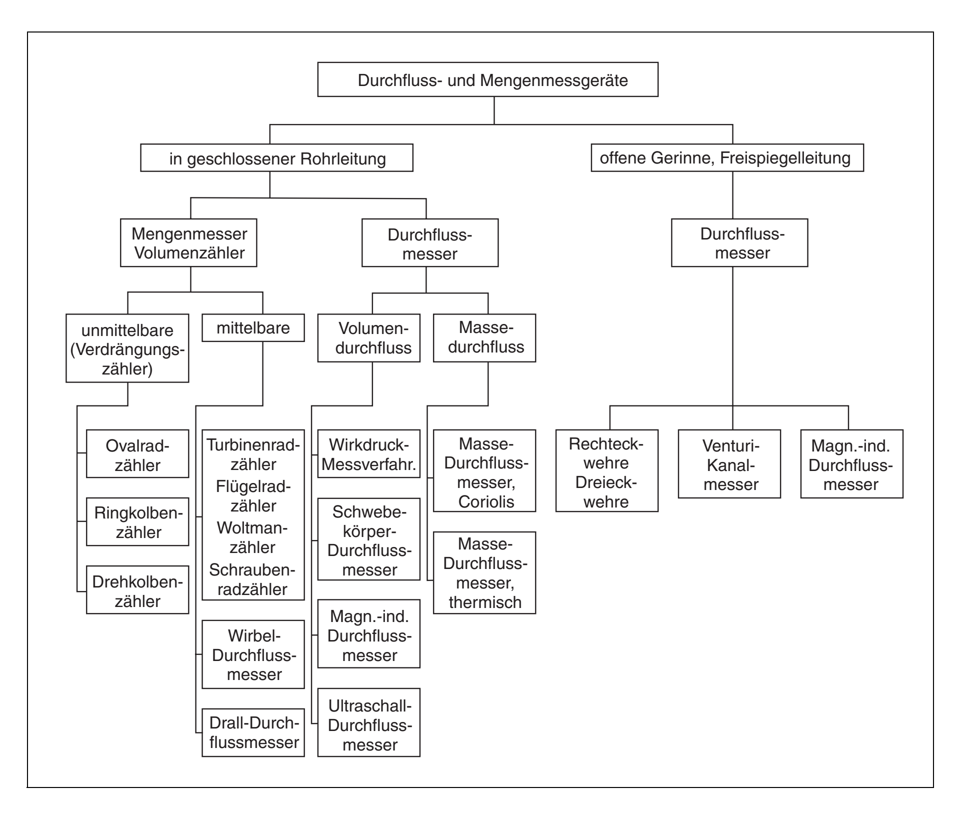
Tatsächlich entstehen am Überfall Verluste, die sich im Überfallkoeffizienten μ ausdrücken:

$$q_v = \frac{2}{3}\ \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \tag{1.27}$$

Basierend auf dieser Gleichung lassen sich die Berechnungsgrundlagen für Messrohre und Messkanäle erstellen.

2 Durchfluss- und Mengenmessung für Gase und Flüssigkeiten

Es gibt eine große Zahl unterschiedlicher Methoden zur Durchfluss- und Mengenmessung. Jedes Verfahren hat seine spezifischen Eigenschaften, die es für bestimmte Einzelfälle prädestiniert. Die marktpolitisch wichtigsten Prinzipien werden im Folgenden beschrieben und gegenübergestellt:



Einteilung der Durchfluss- und Mengenmessgeräte

Die Darstellung unterscheidet für Rohrleitungsmessungen zwischen Mengenmessern und Durchflussmessern. Welche Merkmale kennzeichnen diese zwei Varianten?

Mengenmesser, meistens als Volumenzähler bezeichnet, sind Geräte, die Teilvolumina abgrenzen, erfassen und zum Gesamtvolumen integrieren. Die unmittelbaren Volumenzähler arbeiten mit beweglichen Messkammern, deren Volumen eindeutig definiert ist (vergleichbar einer Eimerkette). Dagegen fehlen die abgeschlossenen Messkammern bei den mittelbaren Zählern, die entweder mechanisch mit Flügelrädern arbeiten und dabei zwischen den Flügeln bestimmte Teilvolumina transportieren oder elektrisch über mengenproportionale Impulse.

Auch die Durchflussmesser wählen den indirekten Weg der Messwertbildung, und zwar entweder über die Erfassung der Fließgeschwindigkeit oder über die Ermittlung der kinetischen Energie der Strömung.

Dem Anwender bleibt die schwierige Aufgabe, das für seinen Zweck technisch richtige und kosteneffiziente Gerät auszuwählen. Gerätebeschreibungen und Auswahlkriterien sollen diese Arbeit unterstützen.

2.1 Volumenzähler

Volumenzähler mit beweglichen Messkammern, die durch das Fluid angetrieben werden, heißen auch Verdrängungszähler. Sie lassen sich für Gase und Flüssigkeiten benutzen. Unmittelbare Volumenzähler sind sie deswegen, weil sie definierte Teilvolumina in geometrisch abgegrenzten Messkammern transportieren.

Zu den mittelbaren Volumenzählern gehören die Volumenzähler mit Messflügeln – auch als Turbinenzähler bezeichnet – und die Volumenzähler mit erzwungenen Strömungsänderungen. Bei diesem Verfahren werden Zählimpulse erzeugt, die ein bestimmtes – nicht räumlich abgegrenztes – Teilvolumen repräsentieren. Das ist beispielsweise die Menge, die beim Flügelradzähler eine Umdrehung veranlasst.

2.1.1 Ovalradzähler

Das Messelement besteht hier aus zwei verzahnten ovalen Zahnrädern.

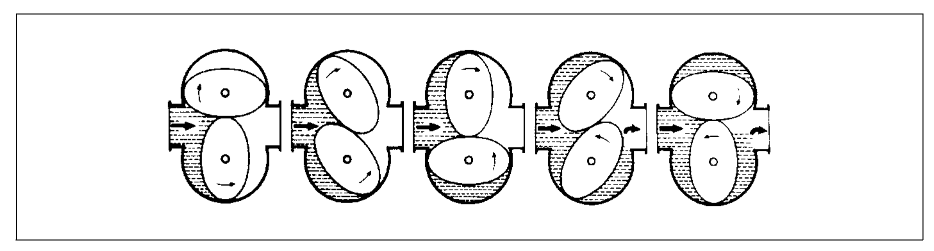


Bild 2-1: Wirkungsweise des Ovalradzählers

Die antreibende Flüssigkeit erzeugt je nach Stellung der Ovalräder unterschiedlich angreifende Drehmomente, die die Räder aufeinander abrollen lassen.

So heben sich beispielsweise in Bild 2-1 links die auf das untere Rad wirkenden Drehmomente auf, während am oberen Rad das einseitig greifende Drehmoment die Drehbewegung verursacht. Über dem oberen Ovalrad entsteht ein abgeschlossenes sichelförmiges Volumen, das in der Folge zum Geräteausgang geschoben wird. Jede Umdrehung des Ovalradpaares transportiert ein definiertes Flüssigkeitsvolumen.

Die Anzahl der Umdrehungen ist somit ein genaues Maß für die durchflossene Menge. Die exakte Verzahnung sorgt für eine gute Abdichtung zwischen den Rädern. Das Spiel zwischen den Ovalradzählern und den Messkammerwänden ist so klein, dass die Spaltverluste gering bleiben.



Bild 2-2: Ovalradzähler für industrielle Flüssigkeiten Ausführung mit Zählwerk

Die Umdrehungen des Ovalradpaares werden entweder über eine permanentmagnetische Kupplung stopfbuchlos auf einen Anzeiger übertragen oder durch einen magnetfeld-gesteuerten Impulsgeber rückwirkungsfrei abgetastet.

Zahnräder und Lager sind mechanische Verschleißteile. Durch die Auswahl der Materialien für Gehäuse, Ovalräder und Lagerungen sowie durch Anbau von Abstandsverlängerungen für hohe Temperaturen sind die Ovalradzähler nahezu an alle Betriebsbedingungen anpassbar.

Die Darstellung der Fehlergrenzen in Bild 2-3 zeigt die Abhängigkeit vom Messstoff, und zwar speziell von der Viskosität. Bei niedriger Viskosität und vorgegebener Genauigkeit ist die Messspanne erheblich kleiner als bei großer Viskosität.

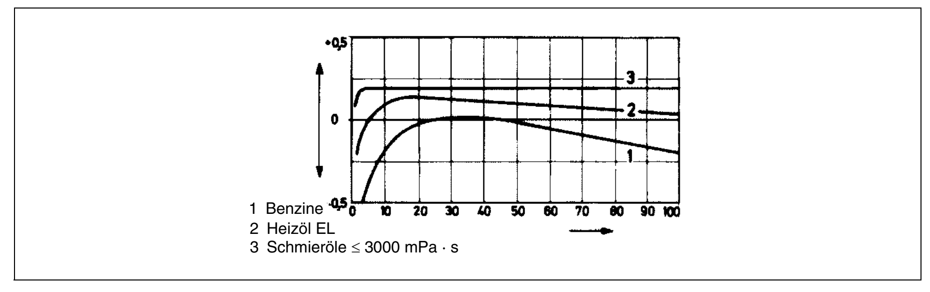


Bild 2-3: Darstellung der messwertbezogenen Fehler

Es ist sicher verständlich, dass der Druckverlust mit größer werdender Viskosität steigt. Die Druckverlust-Kurven (Bild 2-4) beziehen als zusätzlichen Parameter die Gerätegröße ein.

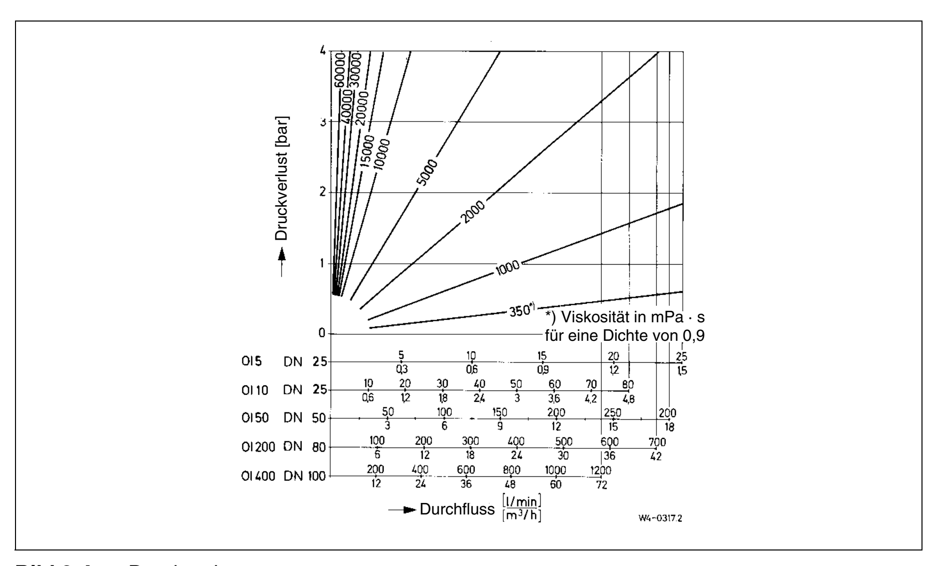


Bild 2-4: Druckverluste

Technische Daten:

Nennweiten: DN 6...DN 400
maximal möglicher Durchfluss: 1200 m^2/h
Viskosität: 0,3...1 · 10^5 mPa · s
maximal zulässiger Druck: 100 bar
maximal zulässige Temperatur: 290 °C
Zulassung der Eichung

2.1.2 Ringkolbenzähler

In einem zylindrischen Gehäuse wird ein Hohlzylinder, nämlich der Ringkolben, exzentrisch zum Umlauf gebracht. Er transportiert dabei definierte Teilvolumina. Die Wirkungsweise ist im Bild 2-5 dargestellt.

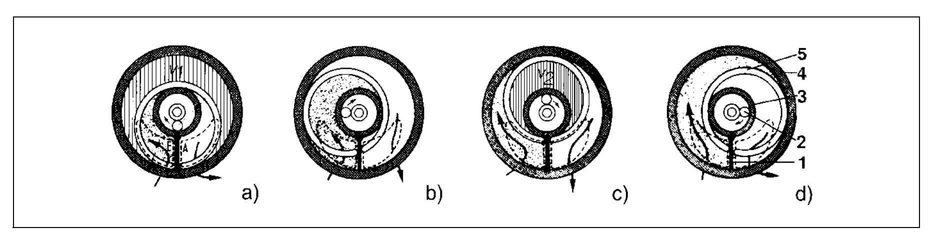


Bild 2-5: Wirkungsweise des Ringkolbenzählers

Der feststehende Außenzylinder (4) ist gleichzeitig das Gehäuse, in dem Trennwand (1) und Führungsring (3) befestigt sind. Die Trennwand grenzt die im Gehäuseboden befindlichen Eintritts- (E) und Austrittsöffnung (A) voneinander ab. Der Ringkolben (5) ist im Zapfen (2) gelagert und an der Trennwand geführt. In seinem Boden befinden sich Öffnungen zum Be- und Entfüllen. In den Stellungen a und b wird das Ringkolbenvolumen V_2 gefüllt. Dabei drückt die Flüssigkeit der Ringkolben weg, so dass das Gehäusevolumen V_1 gefüllt werden kann. Gleichzeitig entleert sich der rechte Teil des Volumen V_1 durch die Kraft, die durch den Ringkolben ausgeübt wird. Wenn die Position d erreicht ist, wurde V_1 einmal vollständig geleert und neu gefüllt, das Volumen V_2 beginnt die Entleerungsphase. Bei einem Umlauf des Ringkolbens werden also die beiden Teilvolumina V_1 und V_2 erfasst.



Bild 2-6: Ringkolbenzähler für Wasser Typ RONDO DIRECT in verschiedenen Nennweiten

Die Bewegung des Kolbenzapfens (2) wird mittels einer aus Mitnehmer und Magnetkupplung bestehenden Übertragungseinrichtung auf das Anzeigewerk übertragen. Beim Ringkolbenzähler RONDO DIRECT ist die Magnetkupplung entfallen. Die Drehbewegung des Kolbens wird direkt mechanisch auf das Zählwerk übertragen.

Da der Ringkolben am schnellsten verschleißt, ist seine Werkstoffauswahl sehr wichtig. Es stehen verschiedene Materialien wie z. B. Grauguss, Bronze, Hartgummi, Kohle und Kunststoff zur Verfügung. Bei hohen Temperaturen verlängert ein Zwischenstück den Abstand zum Zählwerk. Ringkolbenzähler werden insbesondere für die Wasser- und Ölmessung eingesetzt.

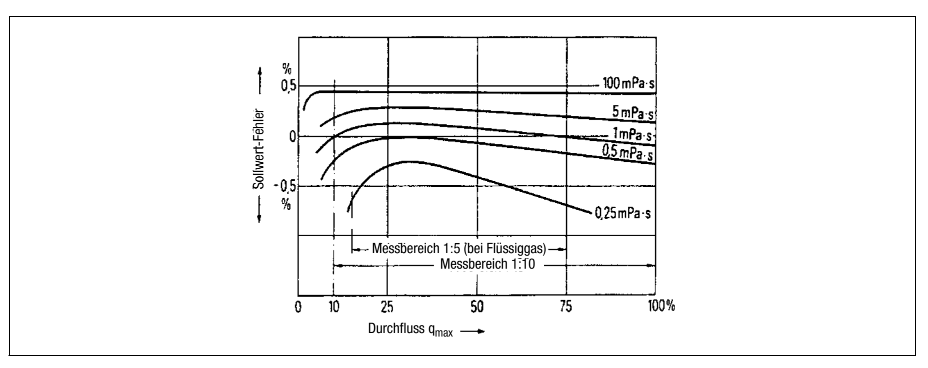


Bild 2-7: Viskositätsabhängige Fehlerdarstellung

Die Fehlerkurven im Bild 2-7 beweisen die hohe Genauigkeit bei großer Viskosität, und zwar deshalb weil die Spaltverluste dann geringer werden. Immerhin lassen sich Ringkolbenzähler noch bei 10.000 mPa·s verwenden.

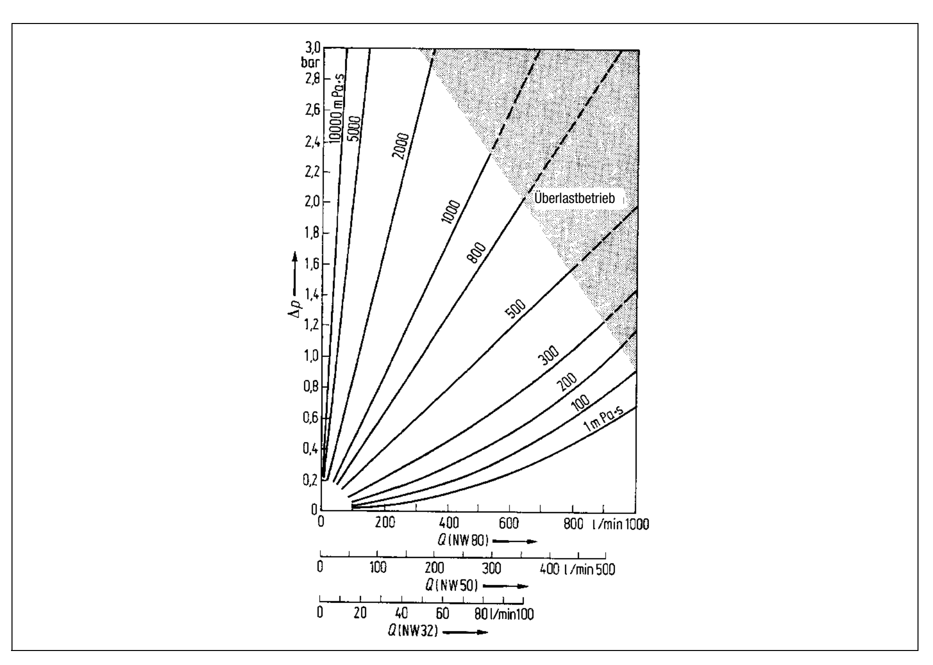


Bild 2-8: Druckverlust

Dass mit steigender Viskosität der Druckverlust zunimmt, zeigt Bild 2-8. Bei großem Differenzdruck muss der verwendbare Werkstoff für den Ringkolben auf seine mechanische Festigkeit geprüft werden.

Technische Daten

Nennweite	DN 15...DN 80
maximal möglicher Durchfluss	1000 m^3/h
Viskosität	0,3...2 · 10^4 mPa·s
maximal zulässiger Druck	PN 100
maximal zulässige Temperatur	300 °C
Zulassung der Eichung	

2.1.3 Drehkolbengaszähler

Zwei Drehkolben, das sind Walzen mit der Querschnittsform einer Acht, wälzen sich, angetrieben durch den Gasstrom, gegenläufig ab. Die Form der Kolben verhindert Berührungen, der Spalt zwischen den Walzen bleibt gleich.

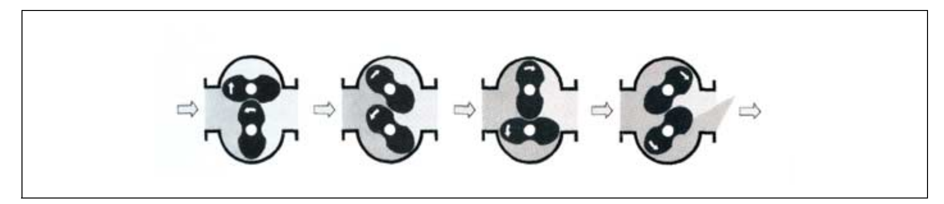


Bild 2-9: Arbeitsweise des Drehkolbenzählers

Ein Zahnradgetriebe außerhalb der Messkammer synchronisiert die Drehkolben. Bei jedem Umlauf werden vier sichelförmige Volumina durch die Messkammer bewegt, wobei die Drehzahl dem Gasdurchfluss proportional ist. Über ein justierbares Feingetriebe erfolgt die Ankopplung an das Zählwerk.

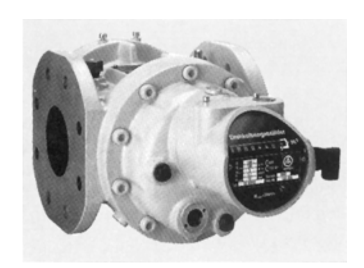
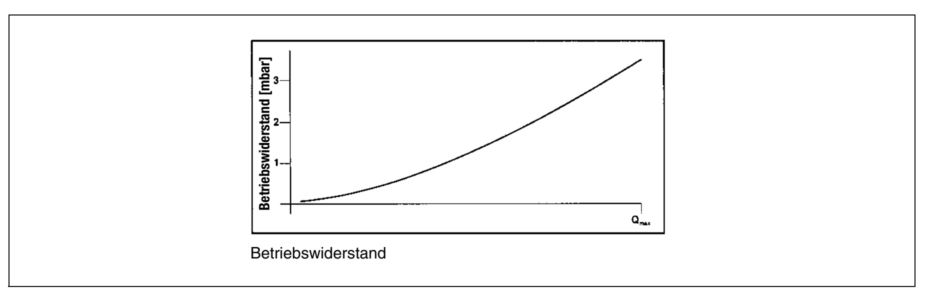


Bild 2-10: Drehkolbengaszähler

Durch die Spalte fließt unter Einfluss des Druckgefälles ein Spaltstrom ungemessen hindurch. Der negative Messfehler wird durch die Justierung ausgeglichen. Bei der Hochdruckmessung steigt die Zähigkeit des Gases, und damit verringert sich der Spaltverlust, so dass sich das verlusttreibende höhere Druckgefälle wieder ausgleicht.

Die pulsierende Gasförderung erzeugt eine Eigenfrequenz, die das angeschlossene Rohrsystem zu Schwingungen anregt. Kommt es zur Resonanz, entstehen starke Geräusche und plötzlicher Druckverlust. Dieser Zustand sollte nicht auftreten; unter Umständen müssen daher Schall-oder Pulsationsdämpfer eingesetzt werden.



Betriebswiderstand

Bild 2-11: Druckverlust des Drehkolbenzählers

Der Druckverlust entsteht aus den mechanischen und dynamischen Widerständen im Zähler. Der dynamische Anteil nimmt mit der Belastung stark zu.

Drehkolbenzähler sind sehr empfindlich gegen Verschmutzung. Da die Verschmutzung den Druckverlust beeinflusst, muss dieser beobachtet und das Gerät gereinigt werden.

Technische Daten

Nennweiten:	DN 40...DN 3000
Durchfluss:	zwischen 3 m^3/h und 6500 m^3/h (Gas im Betriebszustand)
Druckstufe:	max. PN 25
Betriebstemperatur:	-10...+ 40 °C
Messspanne:	bis 1:50
Fehlergrenze:	innerhalb der zulässigen Grenzen für die Eichung, das heißt kleiner als 1 %.

Zulassung der Eichung

2.1.4 Turbinenzähler

Turbinenzähler sind mittelbare Volumenzähler, bei denen die Strömung Flügelräder in Rotation versetzt. Die Zahl der Flügelradumdrehungen ist dem durchflossenen Volumen proportional, die Frequenz der Umdrehungen dem Durchfluss.

Die verschiedenen Ausführungen unterscheiden sich durch die Richtung der Anströmung und durch die Methode der Messwerterfassung.

Flügelradzähler

Das Laufrad des Flügelradzählers wird tangential angeströmt und in Drehung versetzt. Über ein Zahnradgetriebe wirkt die Radachse auf das Zählwerk, das bei Nassläufern in der Flüssigkeit liegt. Flügelradzähler gibt es als Einstrahlzähler (Bild 2-12a) und als Mehrstrahlzähler (Bild 2-12b).

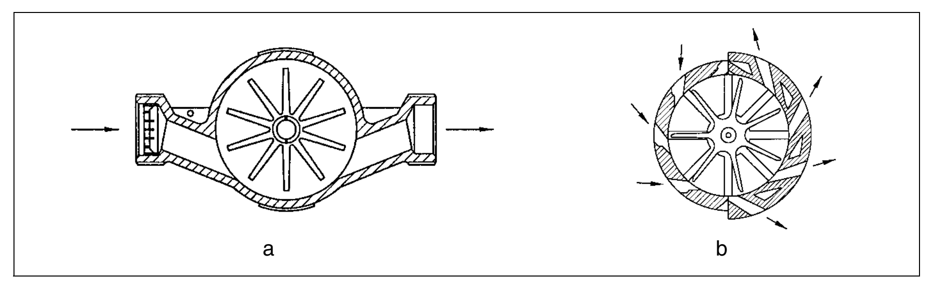


Bild 2-12: Flügelradzähler

Trockenläufer trennen Mess- und Anzeigraum und übertragen die Rotation mit Hilfe von Magnetkupplungen. Flügelradzähler werden als Hauswasserzähler und Wohnungswasserzähler benutzt, dienen aber auch in Heißwasserausführung als Volumenmessteil für kleinere Wärmemengenzähler.

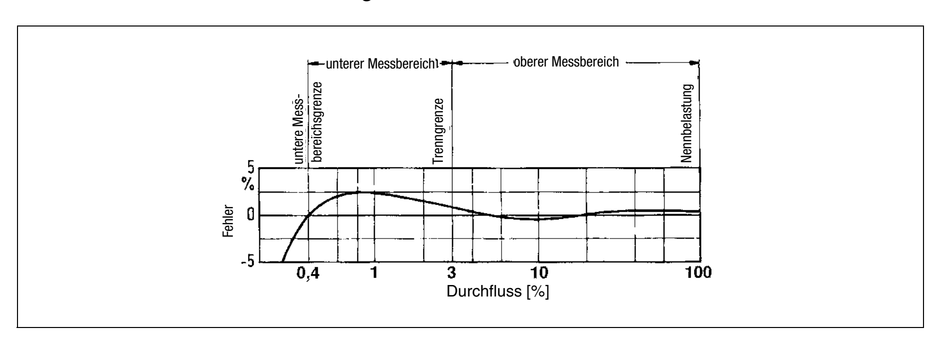


Bild 2-13: Fehlerkurve eines Mehrstrahlflügelradzählers

Bild 2-13 zeigt die Fehlerkurve und zwar bezugnehmend auf die Grenzen des Eichgesetzes, das sind ± 2 % (Kaltwasser)/ ± 3 % (Warmwasser) im oberen und im unteren Messbereich.

Technische Daten:

Nenngrößen	
(abgeleitet vom Durchfluss):	0,6...15 m^3/h
kleinstmöglicher Durchfluss:	12 l/h
größtmöglicher Durchfluss:	30 m^3/h
Viskositätsgrenze:	$\leq$ 5 mPa·s
Zulassung zur Eichung	



Bild 2-14: Schnittbild Einstrahlzähler Typ PICOFLUX



Bild 2-15: Schnittbild Mehrstrahlzähler Typ OPTIMA ARTIST

Woltman-Zähler

Die Achse des Woltman-Laufrades liegt parallel zur Strömungsrichtung. Das Turbinenrad wird also axial angeströmt. Ein reibungsarmes Getriebe verbindet mittels einer Magnetkupplung die Achse mit dem Zählwerk.

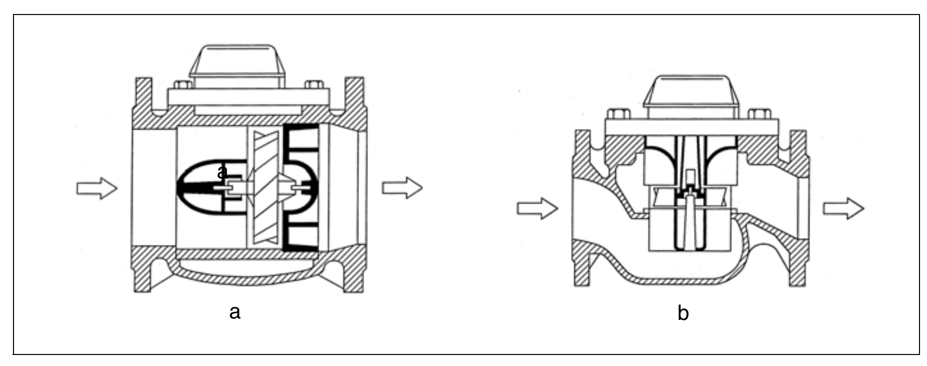


Bild 2-16: Woltman-Zähler

Man unterscheidet zwei markante Bauformen, und zwar den waagrechten „WP“ (Bild 2-16a) oder senkrechten „WS“ (Bild 2-16b) Einbau des Turbinenrades. Der senkrechte Einbau hat den Vorteil der geringeren Lagerreibung und damit der größten Empfindlichkeit. Allerdings ist der Druckverlust, bedingt durch die Strömungsleitung, größer. Der waagrechte Einbau hat die Vorteile beliebige Zählereinbaulage (z. B. Vertikal), größere Messbereiche und kleinerer Druckverlust.

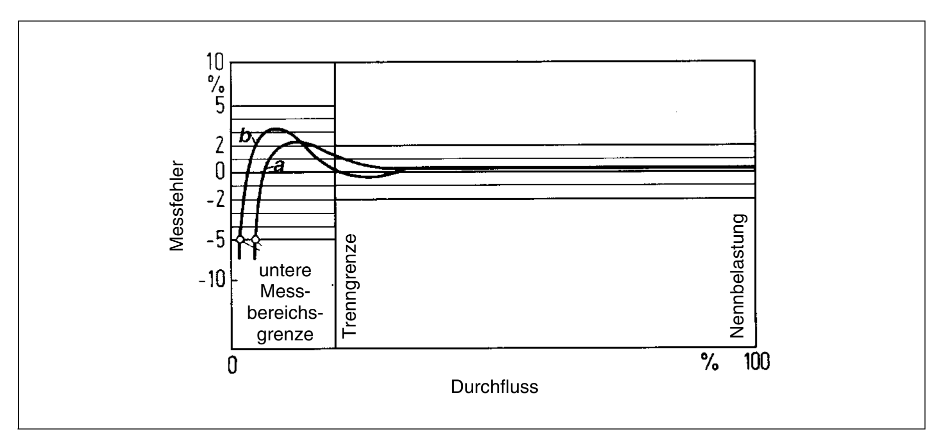


Bild 2-17: Typische Fehlerkurve eines Woltman-Zählers DN 80

Die im Bild 2-17 dargestellte Fehlerkurve bezieht sich auf die Eichfehlergrenzen. Der Woltman-Zähler wird vor allem als Wasserzähler benutzt, dient aber ebenso wie Flügelradzähler auch als Volumenmessteil für Wärmemengenzähler.

Bild 2-18: Schnittbild Woltmannzähler WP Typ HELIX



Bild 2-19: Schnittbild Woltmannzähler WS Typ VERTIX

Für große Messspannen hat man den Verbundwasserzähler „WPV“ (Bild 2-20) konstruiert. Das ist eine Kombination aus einem großen (Hauptzähler) und einem kleinen (Nebenzähler) Zähler. Ein automatisches druckgesteuertes Federumschaltventil besorgt die Umschaltung in einen Bereich, in dem sich die Messbereiche beider Zähler überschneiden.



Bild 2-20: Verbundwasserzähler Typ INLINE mit Nebenzähler MODULMETER MO-N

Während die beschriebenen **Kaltwasserzähler** eine Maximaltemperatur von 40 °C (50 °C) zulassen, kann die Variante **Heißwasserzähler** bis 120 °C (130 °C) verwendet werden. Nach Auswahl geeigneter Werkstoffe wird der Woltman-Zähler auch für industrielle Flüssigkeiten wie vollentsalztes Wasser verwendet.

Technische Daten:

Bauart:	WP	WS	WPV
Nennweiten:	DN 40...500	DN 50...150	DN 50...200
kleinstmöglicher Durchfluss	350 l/h	200 l/h	20 l/h
größtmöglicher Durchfluss	4500 m^3/h	350 m^3/h	600 m^3/h
Viskositätsgrenze:	≤ 3 mPa·s		
Zulassung zur Eichung			

Turbinenradzähler

Turbinenradzähler „WP“, häufig auch als Turbinendurchflussmesser bezeichnet, ähneln in ihrem Grundaufbau den Woltman-Zählern mit dem gravierenden Unterschied, dass der Abgriff der Rotation elektrisch erfolgt und nahezu rückwirkungsfrei ist. Die Turbinenräder sind leicht, die Lager extrem reibungsarm.

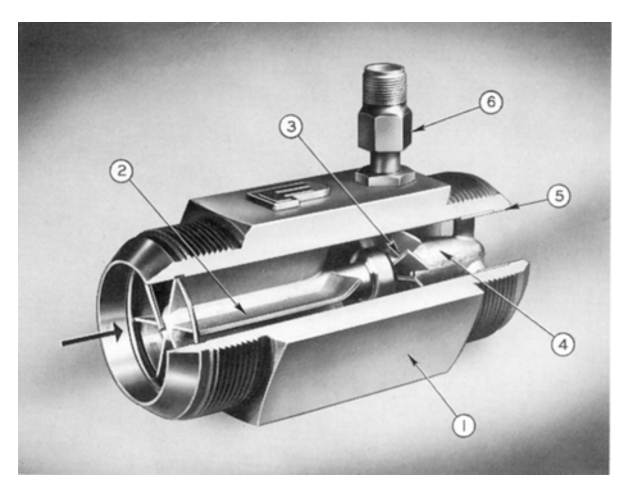


Bild 2-21: Turbinendurchflussmesser

Dadurch wird das System im Anlauf empfindlicher, die Messspanne erweitert sich nach unten. Kleinere Nennweiten sind möglich. Der Turbinenradzähler misst Gase und Flüssigkeiten mit erhöhten Viskositätswerten.

Eine Spule im Gehäuse gegenüber dem Schaufelrad greift das Signal ab, und zwar nach unterschiedlichen Verfahren:

1. Ein Magnet in einem Flügel induziert in der Spule einen Spannungsimpuls bei jedem Umlauf.
2. Die Spule umschließt einen Magneten. Die Flügel bestehen aus einem ferromagnetischen Werkstoff. Die vorbeistreichenden Flügel verzerren das Magnetfeld, es wird wieder ein Spannungsimpuls induziert.
3. Eine hochfrequente Wechselspannung (10 kHz) fließt durch die Spule. Der ferromagnetische Flügel verändert die Amplitude der Speisespannung und moduliert so eine Sekundärfrequenz auf die Trägerfrequenz.

In allen drei Fällen wird in einem nachgeschalteten Verstärker und Wandler eine Signalfrequenz erzeugt, die der Umdrehungszahl und somit dem Durchfluss proportional ist. Deshalb entsteht aus dem Zähler, dessen Einzelimpulse den Wert eines Teilvolumens haben, durch die zeitbezogene Frequenz ein Durchflussmesser.

Interessant ist die Tatsache, dass dies Gerät auch bei höheren Viskositäten arbeitet, allerdings mit der Einschränkung, dass sich der Bereichsanfang für den linear proportionalen Bereich verschiebt (Bild 2-18).

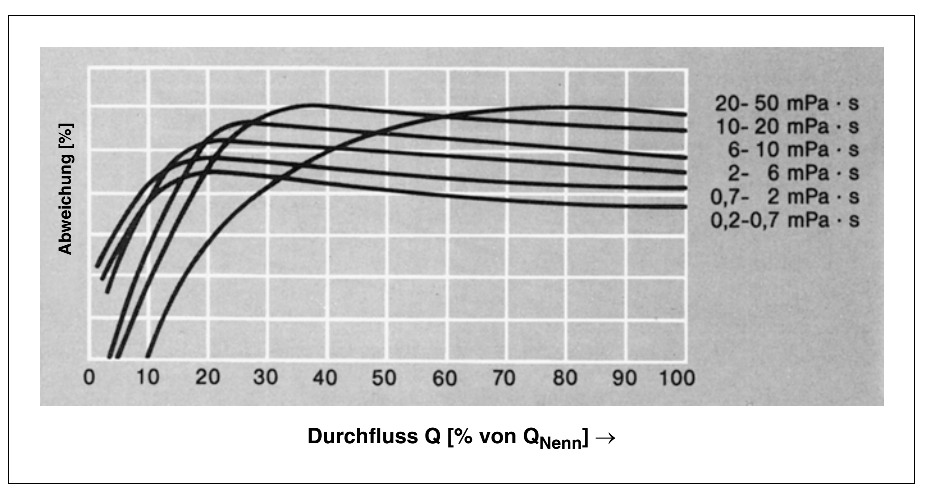


Bild 2-22: Fehlerkurven bei Viskositätseinfluss

Die Messspanne verkleinert sich mit steigender Viskosität. Deshalb muss bei hohen Viskositäten eine bezogene Kalibrierkurve, die dann nicht linear ist, erstellt werden.

Technische Daten:

Nennweiten:	DN 5...DN 600
kleinstmöglicher Durchfluss:	5 l/h (Wasser)
größtmöglicher Durchfluss:	10.000 m^3/h (Wasser)
Messspanne max.:	1:100
Viskositätsgrenze:	700 mPa·s
Temperaturen:	-200 °C (kryogene Flüssigkeit) bis +250 °C (600 °C)
Druckbelastung:	bis 100 bar (1000 bar)
Fehlergrenzen:	+0,25 % v. M. ...+1 % v. M.

Eine spezielle Variante der Turbinenzähler ist der **Turbinenradgaszähler** zur Messung von großen Gasdurchflüssen. Der Gasstrom wird auf einen ringförmigen Querschnitt eingeengt, beschleunigt und auf das leichtgängige Flügelrad geleitet. Der Abgriff erfolgt wieder mechanisch über ein Getriebe auf das Zählwerk.

Dieses Gerät wird schwerpunktmäßig zur Abrechnungsmessung bei Brenngasen verwendet, zumal es für diesen Zweck eichfähig zugelassen ist.

Technische Daten:

Nennweiten:	DN 50...DN 600
kleinstmöglicher Durchfluss:	2,5 m^3/h (Betriebsbedingungen)
größtmöglicher Durchfluss:	25.000 m^3/h
Messspanne:	1:20
Eichfehlergrenze:	+1 % v. M. (Spanne 1:5)
Temperaturgrenzen:	-10...+50 °C

2.1.5 Wirbel-Durchflussmesser

Warum flattert die Fahne im Wind? Weshalb singt der gespannte Draht (Stromleitung) bei Wind? Es gibt eine große Anzahl von Beispielen für die Effekte der Wirbelbildung an umströmten Körpern. Was ereignet sich tatsächlich?

Wie bereits unter Kapitel 1.2.4 erläutert, verursacht das Strömungshindernis Wirbel. An einem freien Störkörper entstehen beidseitig Wirbel, die sich gegenseitig ablösen und so die Karmansche Wirbelstraße bilden. Die oben erwähnte Fahne zeichnet den Verlauf der Wirbelstrasse, der gespannte Draht schwingt mit der **Wirbelfrequenz**.

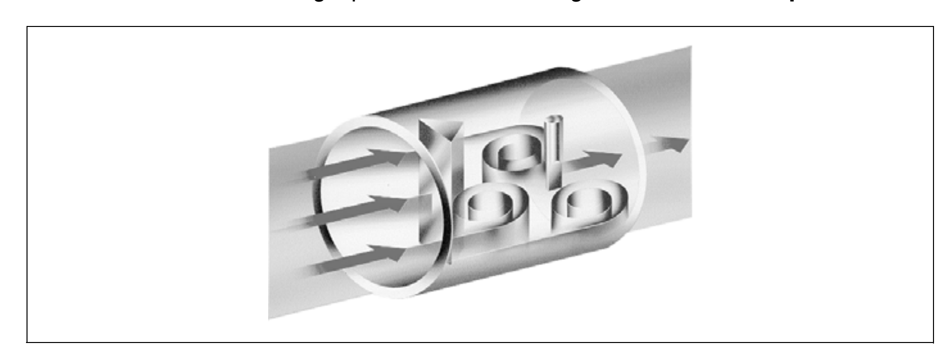


Bild 2-23: Messprinzip

Der geometrische Abstand zweier aufeinander folgender Wirbel sei l, der zeitliche Abstand von einem festen Bezugspunkt betrachtet sei t. Dann gilt für die Wirbelfrequenz f:

$$f \sim \frac{1}{t}$$

Strouhal hat die Zusammenhänge zwischen Geometrie und Geschwindigkeit entdeckt.

$$f \sim \frac{v}{d}$$

Dabei ist d der Durchmesser des runden Störkörpers. Mit der nach Strouhal benannten Proportionalitätskonstanten, der **Strouhal-Zahl** St, heißt es:

$$f = St \frac{v}{d}$$

Die Forderung an den Störkörper ist die, dass die Geometrie der Wirbelbildung sich nicht mit dem Durchfluss ändert und dass die Strouhal-Zahl über einen großen Reynolds-Zahl-Bereich konstant bleibt. Die Formgebung und das Öffnungsverhältnis im Rohr entscheiden über eine exakte Wirbelablösung und über die Konstanz der Strouhal-Zahl. Eine andere Forderung stellt der Messtechniker an das System, nämlich die, dass die Wirbelintensität stark sei. Und schließlich darf der Druckverlust nicht zu groß sein.

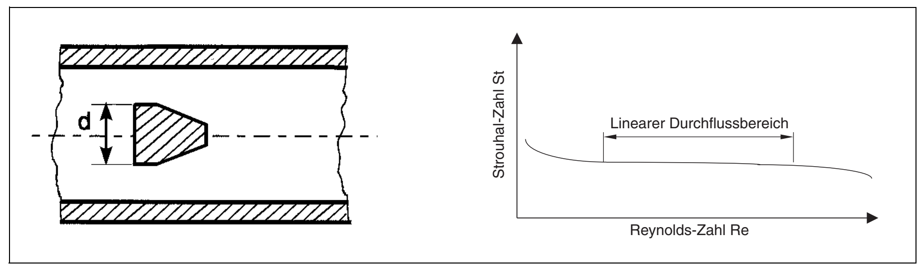


Bild 2-24: Delta-Störkörper und die zugehörige Abhängigkeit der Strouhal-Zahl von der Reynolds-Zahl.

Die optimale Form für den Störkörper hat man durch Berechnung und Empirie ermittelt: **ABB** setzt die Deltaform ein.

Der kleinstmögliche Reynolds-Wert Re_{min} (Bild 2-24) bestimmt den Messbereichsanfang, das bedeutet, dass sich die Messspanne mit steigender Viskosität verkleinert. Die obere Re-Grenze liegt so hoch, dass sie für den Bereichsendwert bedeutungslos bleibt.

Die Methoden der Wirbelerfassung sind unterschiedlich. Die Wirbel erzeugen periodische Druck- und Geschwindigkeitsänderungen, das sind Begleiteffekte, die eine Erfassung ermöglichen. **ABB** bringt einen Sensor hinter den Störkörper oder freischwingend in den Störkörper (abhängig von Nennweite und Anschlussart), dessen Zunge durch die Druckunterschiede im Wirbeltakt ausgelenkt wird.

Piezoaufnehmer im Inneren des Sensors wandeln die entstehende Pressung in elektrische Größen um, die als Zählimpulse verstärkt werden. Die Verteilung von vier Piezoaufnehmern ist so gewählt, dass sich Vibrationen der Rohrleitung im Sensor eliminieren.

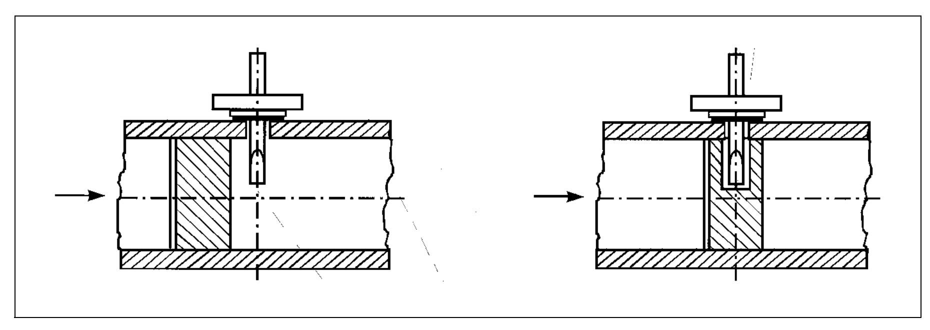


Bild 2-25: Sensor im Wirbel-Durchflussmesser

Strömt das Fluid mit einem gestörten Strömungsprofil (Wirbel, Drall) in die Messstrecke, so können sich die Wirbel nicht sauber ausbilden. Deshalb müssen dem Gerät Beruhigungsstrecken vorgeschaltet werden, deren Länge von der Art der Störung abhängt.

Mit dem Wirbel-Durchflussmesser können die Durchflüsse von Dampf, Gasen und Flüssigkeiten gemessen werden.

Die Kompaktausführung **FV4000-VT4** (Bild 2-28) verbindet Aufnehmer und Umformer zu einer Einheit mit örtlichem Display für Durchfluss- und Mengenanzeige. Der Umformer basiert auf einem Digitalen Signalprozessor (DSP) und erzeugt ein 4...20 mA-Signal am Analogausgang. Als Zweileitergerät erfordert es eine Versorgungsspannung von 14 V...46 V DC, die über eine 2-Draht-Leitung über den Analogausgang eingespeist wird.

Neben dem Analogausgang ist noch ein Binärausgang vorhanden. Dieser kann als Impulsausgang oder Grenzkontakt konfiguriert werden. Die Messwertanzeige für Gase und Flüssigkeiten erfolgt in direkt ablesbaren physikalischen Betriebseinheiten.

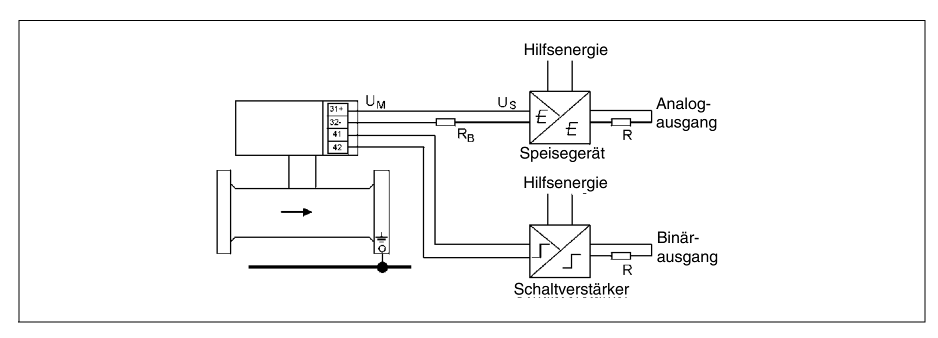


Bild 2-26: 2-Leiter-Anschlussbild

Über einen in den Sensor integrierten Pt 100 kann ohne Mehraufwand eine Sattdampf-Messung oder eine Temperaturüberwachung realisiert werden.

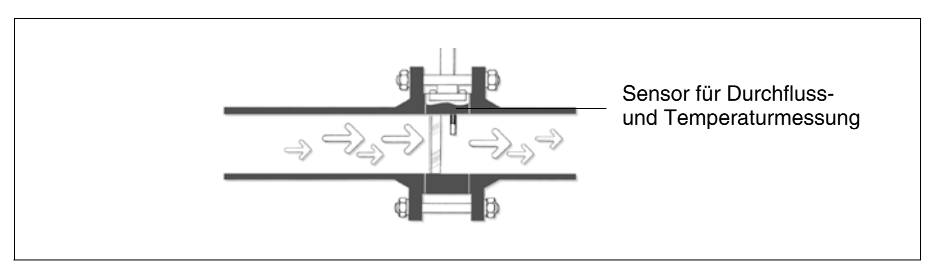


Bild 2-27: Sensor für Durchfluss und Temperaturmessung



Bild 2-28: Kompaktbausweise: FV4000-VT4 (hier: Flansch-Gerät)

Bild 2-29: Getrennte Montage: FV4000-VR (hier: Zwischenflansch-Gerät)

Der Messumformer kann auch räumlich abgesetzt montiert werden, indem ein spezielles Kabel mit einer max. Länge von 10 m (Bild 2-29) verwendet wird. Er kann an eine Wand montiert oder mit einem Rohr-Montageset installiert werden.

Ausführung 2-Leitertechnik mit Feldbusschnittstelle

Der Messumformer ist in 2-Leiter-Technik ausgeführt, d. h. Spannungsversorgung und digitale Kommunikation der Feldbus-Schnittstelle werden über die gleichen Leitungen geführt. Parallel steht noch ein Schaltausgang zur Verfügung für Grenzwert- oder Systemüberwachung. Alle eingespeicherten Daten bleiben bei Netzausfall erhalten.

Zur Bedienung und Konfiguration kann das Device Management Tool DSV4xx (SMART VISION) für intelligente Feldgeräte eingesetzt werden, wobei die FDT/DTM-Technologie genutzt wird. Über verschiedene Kommunikationswege ist der Datenaustausch mit einer kompletten Feldgerätepalette ermöglicht. Die Haupteinsatzziele liegen in der Parameteranzeige, Konfiguration, Diagnose, Dokumentation und Datenverwaltung für alle intelligenten Feldgeräte, die selbst den Kommunikationsanforderungen genügen.

Gemeinsame Daten

Zulässige Speisespannung:	9 V...32 V (kein Ex-Schutz)
Stromaufnahme:	Normalbetrieb: 10 mA
	FDE (Fault Disconnection Electronic): 13 mA
Ex-Ausführung:	II 2 G EEx ia IIC T4

Kommunikation PROFIBUS PA

Der Messumformer eignet sich zum Anschluss an Segmentkoppler DP/PA.

PROFIBUS PA-Protokoll

Ausgangssignal gemäß EN 50170 Volume 2, PROFIBUS
Übertragungstechnik IEC 1158-2/EN 61158-2
Übertragungsgeschwindigkeit: 31,25 KByte/s

PROFIBUS Profil-Version 3.0

Ident-Nr.: 05DC hex

Funktionsblöcke:	**2 x AI, 1 x TOT**
GSD-Dateien:	-PA139700 (1 x AI)
	-PA139740 (1 x AI, 1 x TOT)
	-ABB_05DC (2 x AI, 1 x TOT + herstellerspezifische Daten)

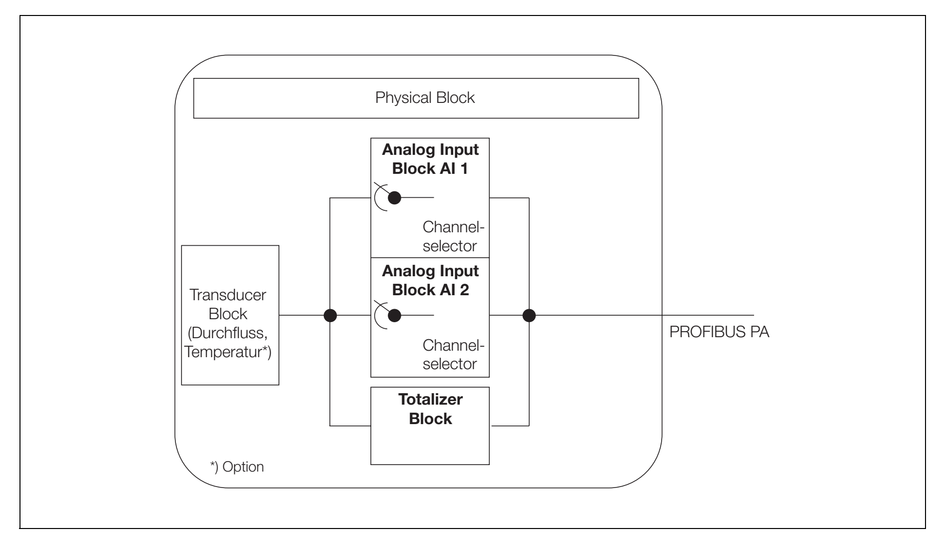


Bild 2-30: Blockstruktur des FV4000 mit PROFIBUS PA

Über den Channelselector ist die Ausgangsgröße (Volumen-, Norm-, Massedurchfluss oder Temperatur) auswählbar.

Kommunikation FOUNDATION Fieldbus
Der Messumformer eignet sich zum Anschluss an spezielle Speisegeräte oder ein Linking Device.

FOUNDATION Fieldbus-Protokoll
Ausgangssignal gemäß FOUNDATION Fieldbus-Protokoll
Spezifikation 1.4 / ITK 4.01 für den H1-Bus
Übertragungstechnik IEC 1158-2/EN 61158-2
Übertragungsgeschwindigkeit: 31,25 KByte/s

Manufacturer ID:	0x000320
Device ID:	0x0015
Reg-Nummer:	IT013600

Funktionsblöcke: 2 x AI / FV4000 hat LAS-Funktionalität

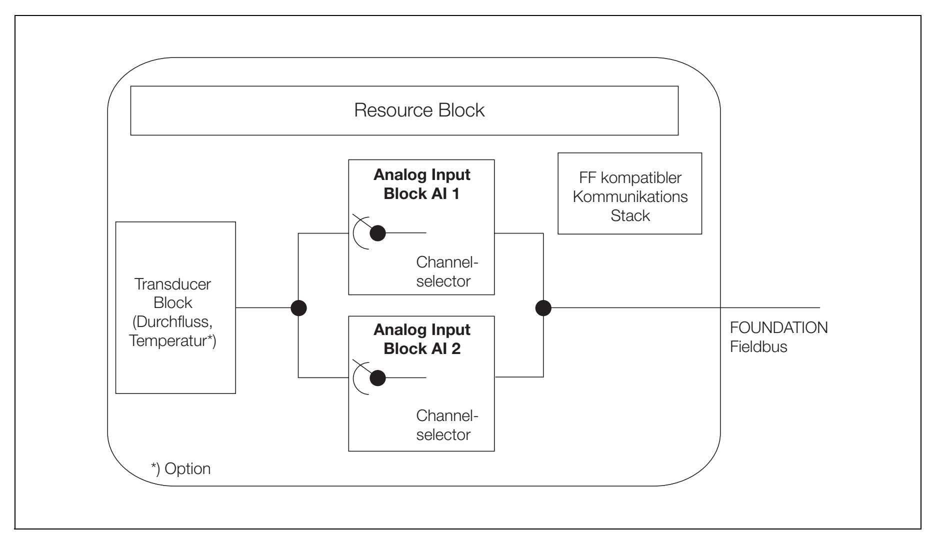


Bild 2-31: Blockstruktur des FV4000 mit FOUNDATION Fieldbus

Über den Channelselektor ist die Ausgangsgröße (Volumen-, Norm-, Massedurchfluss, Zähler oder Temperatur) auswählbar.

Geräteauswahl
Die Wirbel-Durchflussmesser werden in den Nennweiten DN 15 bis DN 300 gefertigt.

ABB stellt kostenlos Hilfsmittel zur Verfügung, die zur Auswahl und Auslegung der für eine Messaufgabe geeigneten Messgeräte dienen, aber auch Unterstützung für Bestellungen bieten.

Wasser $\rho = 1000\ kg/m^3$ $\nu = 1 \cdot 10^6 m^2/s$				Gas $\rho = 1,2\ kg/m^3$ $\eta = 18,2 \cdot 10^6\ Pa \cdot s$	
DN	inch	Messspanne [m³/h]	Re_{min}	Messspanne [m³/h]	Re_{min}
15	½	0,5... 6	20,000	4... 24	20,000
25	1	0,8... 18	20,000	14... 150	20,000
40	1½	2,4... 48	20,000	30... 390	20,000
50	2	3,0... 70	20,000	40... 500	20,000
80	3	8,0... 170	40,000	90... 1200	25,000
100	4	10,0... 270	40,000	150... 1900	40,000
150	6	30,0... 630	70,000	300... 4500	40,000
200	8	70,0...1100	70,000	250... 8000	40,000
250	10	60,0...1700	70,000	800...14000	40,000
300	12	95,0...2400	70,000	1400...20000	40,000

Tab. 2-1: Wirbel-Durchflussmesser FV4000, Messbereiche

Die in Tab. 2-1 aufgeführten Messbereiche für Wasser müssen anhand des Diagramms (Bild 2-32) überprüft werden, wenn andere Flüssigkeiten mit größerer Viskosität zum Einsatz kommen.

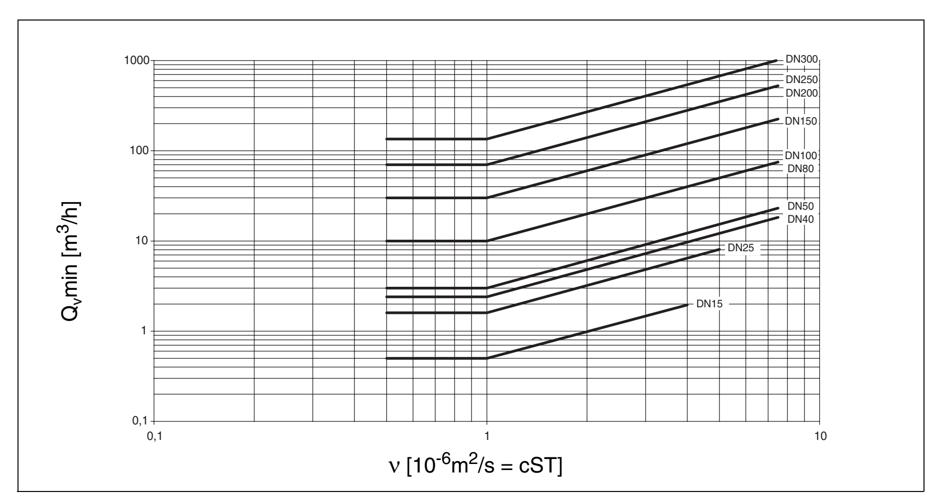


Bild 2-32: Minimale Durchflussrate, Flüssigkeiten in Abhängigkeit von der kinetischen Viskosität

Zur Vermeidung von Kavitation wird in der Messzone ein Überdruck gefordert, der sich folgendermaßen errechnet:

$$p_2 \geq 1,3 \cdot p_D + 2,6 \cdot \Delta p$$

p_2 = Statischer Überdruck hinter dem Gerät
p_D = Dampfdruck der Flüssigkeit bei Betriebstemperatur
Δp = Druckverlust (Diagramm Bild 2-27)

Bei der Auswahl von Geräten für die Messung bei Gasen oder Dampf muss man berücksichtigen, dass sich die Tabellenwerte auf Luft beziehen und dass der Wirbel-Durchflussmesser Betriebseinheiten erfasst. Deshalb berechnet man zuerst die Betriebsdichte (ρ_N = Normdichte)

$$\rho = \rho_N \frac{1,013 + p}{1,013} \cdot \frac{273}{273 + T} \qquad (2.2)$$

und dann den Durchfluss in Betriebseinheiten

$$q_v = \frac{1}{\rho} \cdot q_m \text{ oder } q_v = q_n \frac{\rho_N}{\rho} \qquad (2.3)$$

q_m = Massedurchfluss in kg/h
q_n = Normdurchfluss in m³/h

q_v ist der Durchflusswert, der in der Tabelle die Nennweite des Gerätes bestimmt. Für den Bereichsanfang ist die Betriebsdichte maßgebend, siehe Bild 2-32.

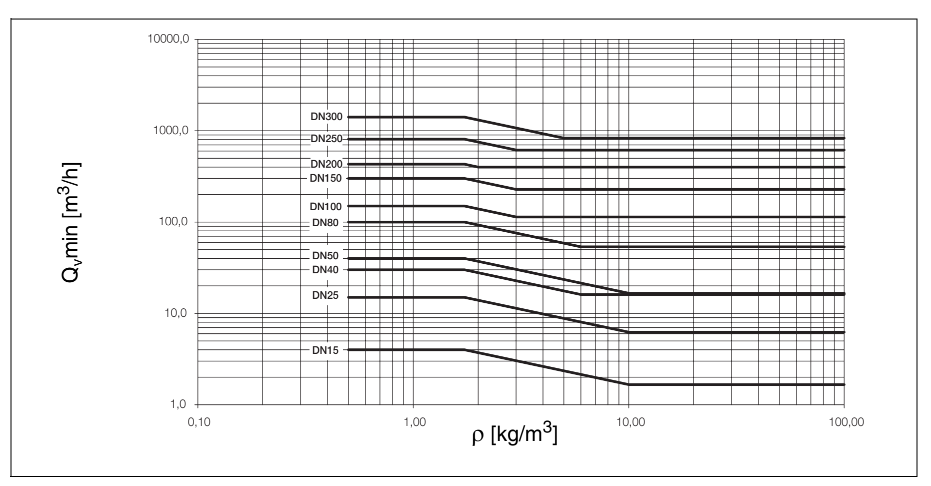


Bild 2-33: Minimale Durchflussrate, Gas/Dampf in Abhängigkeit der Messstoffdichte, DIN-Ausführung (280 °C)

Aufgrund der Tatsache, dass ein Wirbeldurchflussmesser einen Störkörper im Inneren hat, erzeugt dieser einen Druckabfall, der abhängig von der Durchflussrate ist (Bild 2-34).

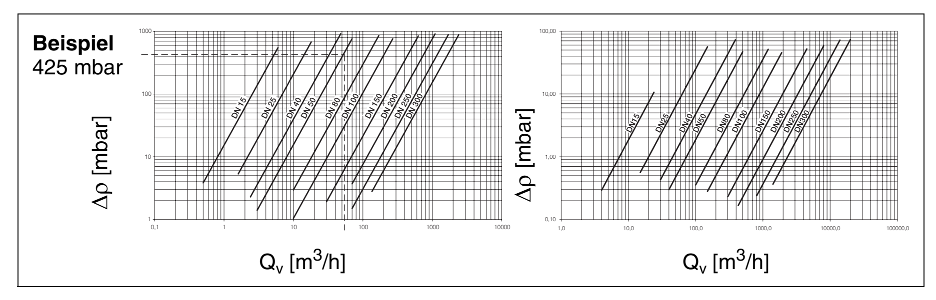


Bild 2-34: Druckverluste bei Wasser (links) und bei Luft (20 AC, 1,013 bar), DIN-Ausführung

Für Sattdampf-Messung ist im Messumformer ein spezielles Programm integriert. Ein separates Untermenü ist installiert, das Sattdampf-Tabellen zu Korrekturberechnungen beinhaltet. Durch die integrierte Temperaturmessung wird die Messung mit minimalstem Aufwand realisiert. Das Massen-Durchflusssignal steht am Analogausgang direkt zur Verfügung.

Technische Daten (Einbaulänge)

		Flanschanschlüsse		Zwischenflansch	
DN	inch	DIN	ANSI	DIN	ANSI
15	½	200	200	65	112,5
25	1	200	200	65	112,5
40	1¼	200	200	65	113
50	2	200	200	65	112,5
80	3	200	200	65	111
100	4	250	250	65	116
150	6	300	300	65	137
200	8	350	350	–	–
250	10	450	450	–	–
300	12	500	500	–	–

Tab. 2-2: Baulängen in mm

Technische Daten

Temperaturgrenzen:	-55...+400 °C (Messstofftemperatur) -55...+70 °C (Umgebungstemperatur)
max. möglicher Druck:	160 bar
Messwertabweichung:	≤ 1 % v. M. bei Gasen, Dampf ≤ 0,75 v. M. bei Flüssigkeiten
messstoffberührende Werkstoffe:	1.4571, Option Hastelloy-C
Ex-Schutz:	II 2 G EEx ib II C T4 II 2 G EEx d II C T6 II 2D T 85 °C...T_{med} IP 67 FM Class I Div1, Gruppe A, B, C, D

Einbau des Aufnehmers

Die folgenden Empfehlungen sollten bei der Installation des Aufnehmers in die Rohrleitung beachtet werden.

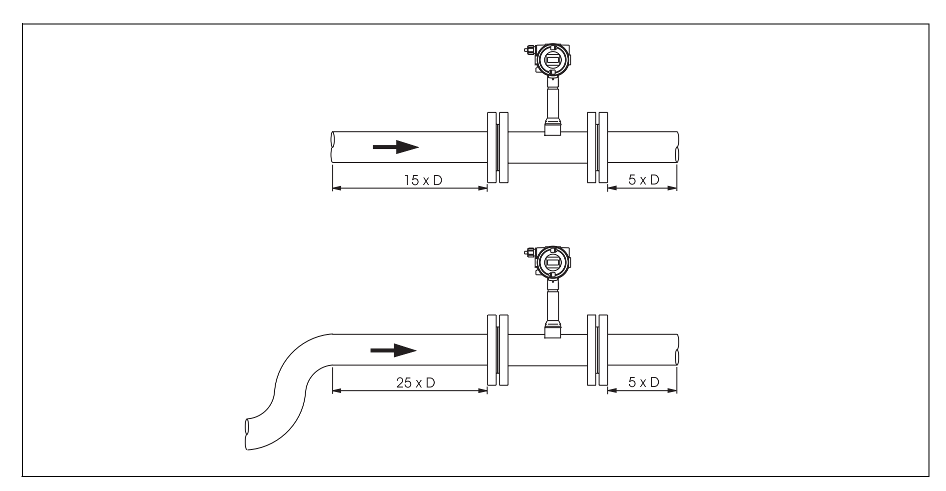


Bild 2-35: Vor- und Nachlaufstrecken

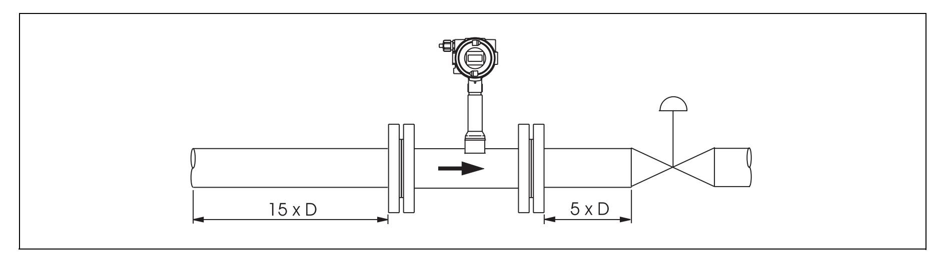


Bild 2-36: Regelventil-Einbauort

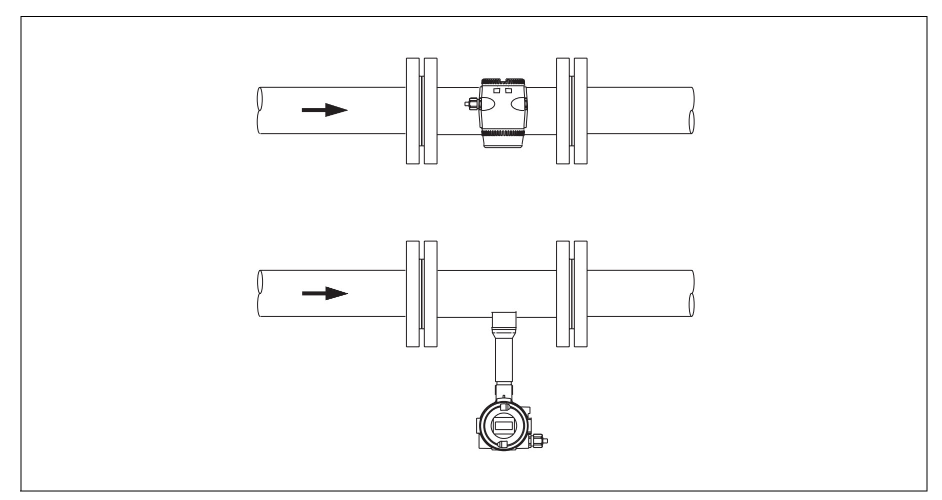


Bild 2-37: Einbaulage bei hohen Temperaturen, Messstofftemperatur > 150 °C

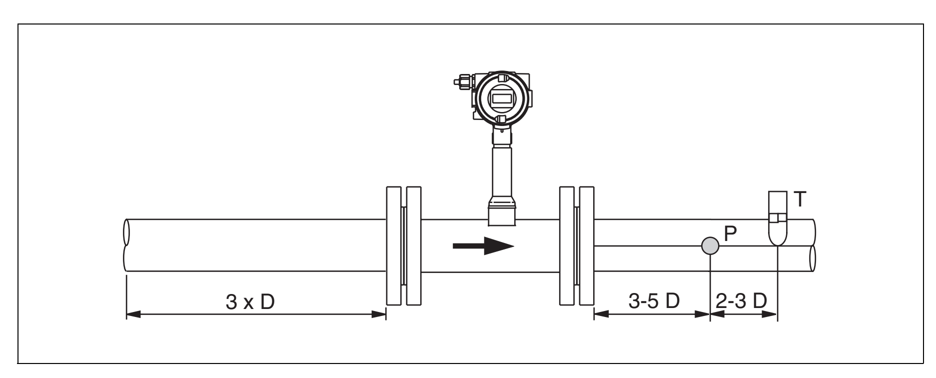


Bild 2-38: Anordnung von Druck- und Temperaturmessstellen

2.1.6 Drall-Durchflussmesser

Im Eintritt eines Gerätes befindet sich ein Leitkörper, der in seiner Form einem feststehenden Turbinenrad entspricht. Dadurch wird der Messstoff zur Rotation gezwungen. In einer Art Schraubenbewegung fließt der Messstoff durch das Messrohr des Drall-Durchflussmessers.



Bild 2-39: Schnittbild des Drall-Durchflussmessers

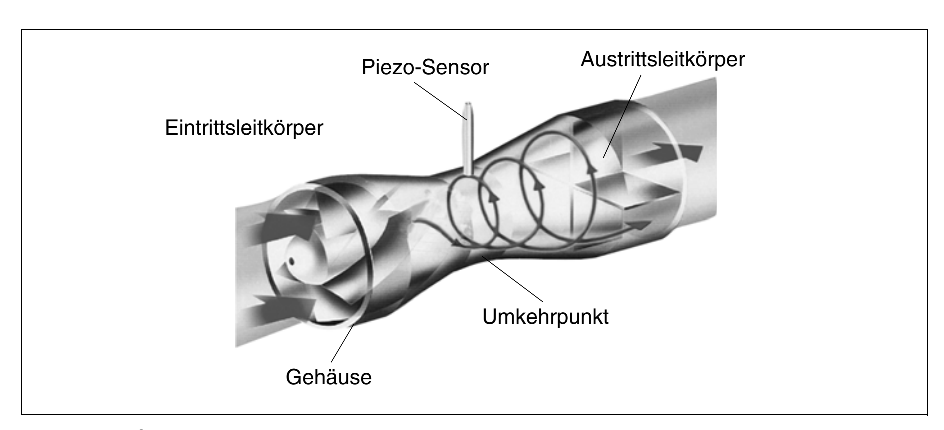


Bild 2-40: Strömungsverlauf im Drall-Durchflussmesser

Im zylindrischen Abschnitt des Messrohres stabilisiert sich der Drall. Eine Querschnittbetrachtung in diesem Teil zeigt, dass die Rotationsgeschwindigkeit an der Rohrwand relativ klein ist und zur Rohrachse zunimmt, bis sich in der Rohrmitte der stabile Wirbelkern ausbildet. Beim Übergang der Strömung in den sich erweiternden Teil des Rohres wird der Wirbelkern ausgelenkt, und zwar dadurch, dass es im erweiterten Bereich zur Rückströmung kommt.

Der Wirbelkern führt eine schraubenförmige Sekundärrotation aus, deren Umlauffrequenz dem Durchfluss in weiten Grenzen linear proportional ist. Diese Sekundärrotation wird mit einem Piezofühler erfasst. Der Piezofühler nutzt die beim Umlauf entstehenden Druckunterschiede zur Impulserfassung.

Beim Drall-Durchflussmesser werden die gleichen Sensoren wie beim Wirbel-Durchflussmesser verwendet. Die Wirbelfrequenz liegt zwischen 10 und 1500 Hz; höhere Frequenz bedeutet größeren Durchfluss.

Die Messumformer wandeln das Sensorsignal in weiterverarbeitbare Signale um. Es werden dieselben Umformer wie beim Wirbel-Durchflussmesser eingesetzt.



Bild 2-41: Kompaktbauweise: FS4000-ST4 **Bild 2-42:** Getrennte Montage: FS4000-SR4

Mit diesem Drall-Durchflussmesser können Durchflussmessungen von Flüssigkeiten, Gasen und Dampf durchgeführt werden.

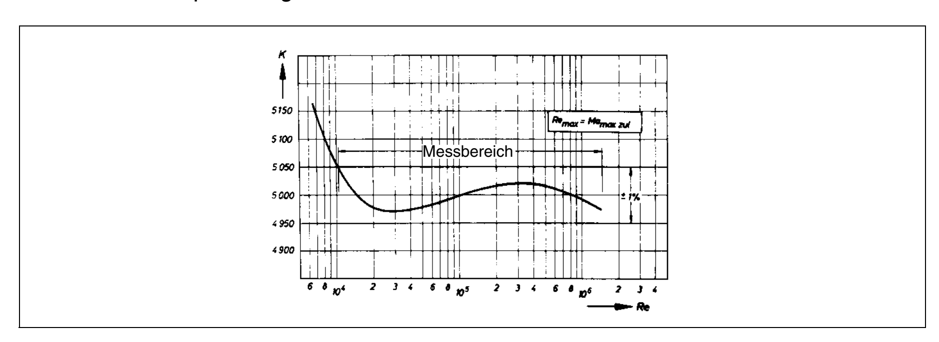


Bild 2-43: Kalibrierkurve eines Drall-Durchflussmessers

Bild 2-43 zeigt die typische Kalibrierkurve eines Drall-Durchflussmessers. Auf der Ordinaten ist der K-Faktor in Impulse pro Volumeneinheit aufgetragen als Funktion der Reynolds-Zahl auf der Abszisse. Diese halbdimensionslose Darstellung ist deswegen

sinnvoll, weil die messstoffabhängigen Größen durch die Reynolds-Zahl ausgedrückt werden. So lässt sich beispielsweise erklären, dass der Messbereichsanfang bei größerer Viskosität nach oben wandert und damit die lineare Messspanne verkleinert. Natürlich kann man auch im nichtlinearen Bereich Messwerte erfassen. Normweiten abhängig sind Viskosität bis 30 m Pas zulässig.

Jedes Gerät hat eine eigene Kalibrierkurve, die als konstante Eigenschaft des Gerätes gilt; sie würde sich nur dann ändern, wenn es in der Messzone mechanische Verformungen gibt. Bei anwendungsbezogen verkleinerten Messspannen lässt sich eine bessere Messgenauigkeit als für die Gesamtspanne mit ± 0,5 % v. M. erzielen.

Mit der Verwendung von DSP-gesteuerten Messumformern kann eine Linearisierung der Kalibrierkurve erreicht werden. Mit der aktuell angewendeten 5-Punkte-Kalibrierung wird eine Genauigkeit von 0,5 % des Messwertes bei Flüssigkeiten, Gasen und Dampf erreicht.

Der besondere Vorteil eines Drall-Durchflussmessers gegenüber anderen Systemen besteht darin, dass sehr geringe Ein-/Auslaufstrecken erforderlich sind. Zur Sicherstellung der angegebenen kleinen Messunsicherheit werden Ein-/Auslaufstrecken von 3D/1D empfohlen.

Wasser $\rho = 1000\ kg/m^3$ $\nu = 1 \cdot 10^6 m^2/s$			Gas $\rho = 1,2\ kg/m^3$ $\eta = 18,2 \cdot 10^6\ Pa \cdot s$
DN	inch	Messspanne [m³/h]	Messspanne [m³/h]
15	½	0,1... 1,6	2,5... 16
20	¾	0,2... 2	2,5... 25
25	1	0,4... 6	5 ... 50
32	1¼	0,8... 10	7 ... 130
40	1¼	1,6... 16	12 ... 200
50	2	2,5... 25	18 ... 350
80	3	3,5... 100	60 ... 850
100	4	5,0... 150	65 ... 1500
150	6	15,0... 370	150 ... 3600
200	8	25 ... 500	200 ... 5000
300	12	100 ...1000	400 ...10000
400	16	180 ...1800	1000 ...20000

Tab. 2-3: Drall-Durchflussmesser, Messbereiche in m^3/h (qv)

Geräte-Auswahl

Drall-Durchflussmesser der Nennweiten DN 15...DN 400 sind lieferbar. Tab. 2-3 enthält die zugehörigen Messbereiche. Bei Flüssigkeitseinsatz erreicht man eine maximale Fließgeschwindigkeit von 6 m/s, bei Gasen von maximal 50 m/s.

ABB stellt kostenlos Hilfsmittel zur Verfügung, die zur Auswahl und Auslegung der für eine Messaufgabe geeigneten Messgeräte dienen, aber auch Unterstützung für Bestellungen bieten.

Beim Einsatz in Flüssigkeiten ist darauf zu achten, dass Kavitation vermieden werden muss. Deshalb muss ein genügend großer Überdruck in der Messzone herrschen. Sicherheitshalber sollte folgende Überprüfung stattfinden:

$$p_2 \geq 1,3 \cdot p_D + 2,6 \cdot \Delta p$$

p_2 = Statischer Überdruck hinter dem Gerät
p_D = Dampfdruck der Flüssigkeit bei Betriebstemperatur
Δp = Druckverlust (Diagramm)

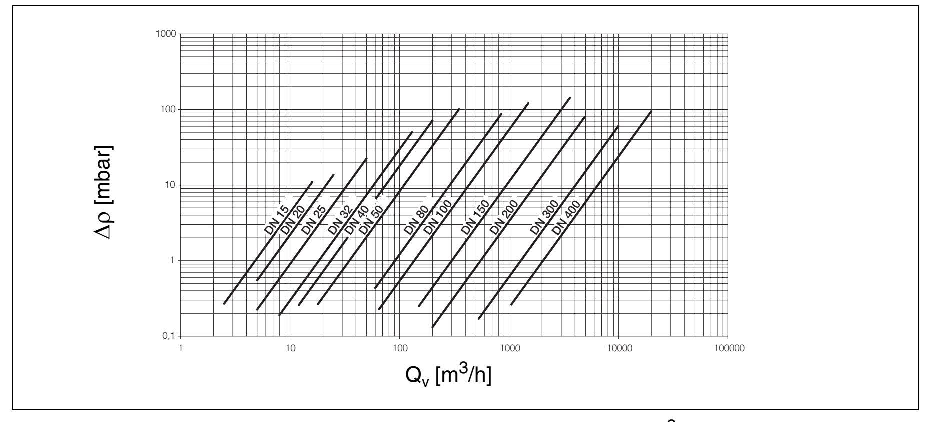


Bild 2-44: Druckverluste bei Luft (22 °C; 1013 mbar, ρ = 1,205 kg/m^3)

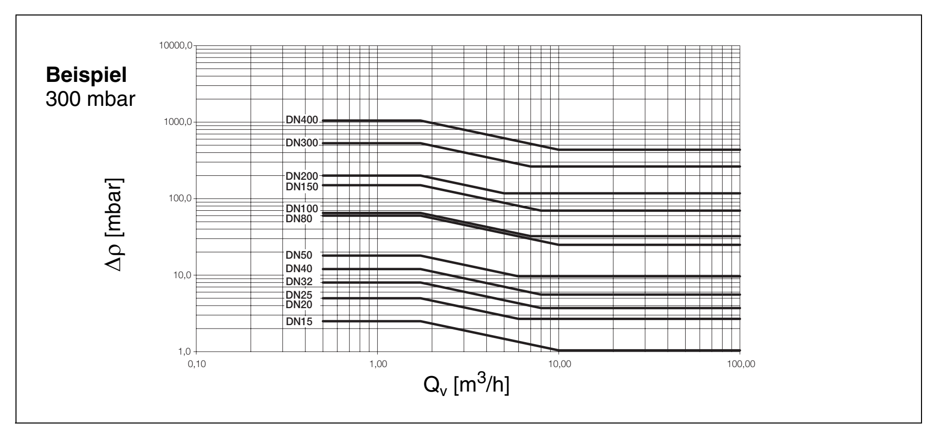


Bild 2-45: Druckverluste bei Wasser (20 °C, 1013 mbar, ρ = 998 kg/m^3)

Bei der Auswahl von Geräten für die Messungen von Gasen ist die Umrechnung auf Betriebswerte gefordert.

$$\rho = \rho_N \frac{1,013 + p}{1,013} \cdot \frac{273}{273 + T} \tag{2.4}$$

ρ = Betriebsdichte (kg/m^3)
ρ_N = Normdichte (kg/m^3)
p = Betriebsdruck (bar)
T = Betriebstemperatur (°C)
q_v = Betriebsdurchfluss (m^3/h)
q_N = Normdurchfluss (m^3/h)

$$q_v = q_N \frac{\rho_N}{\rho} \tag{2.5}$$

Mit dem Messumformer kann diese Berechnung automatisch erfolgen.

Messumformer

Die beim Wirbel-Durchflussmesser verwendeten und dort beschriebenen Messumformer werden auch beim Drall-Durchflussmesser eingesetzt.

Technische Daten:

Temperaturgrenzen:	-55 °C...+280 °C (Messstofftemperatur) -55 °C...+ 70 °C (Umgebungstemperatur)
max. möglicher Druck:	40 bar
Messwertabweichung:	0,5 % v. M.
Messstoffberühr. Werkstoffe:	1.4571 (Hastelloy C)
Ex-Schutz:	II 2 G EEx ib II C T4 II 2 G EEx d II C T6 II 2D T 85 °C...T_{med} IP 67 FM Class I Div1, Gruppe A, B, C, D

Installation des Aufnehmers

Die folgenden Empfehlungen sollten bei der Installation des Aufnehmers in die Rohrleitung beachtet werden.

Es sind keine Einlauf- und Auslaufstrecken erforderlich, falls die Kurvenradien von einfachen oder doppelten Rohrbögen im Einlauf oder Auslauf des Drall-Durchfluss-messers größer als 1,8 x D sind.

Für im Auslauf eingesetzte geflanschte Reduzierung nach DIN 28545 ($\alpha/2 = 8°$) sind keine zusätzlichen Einlauf- und Auslauf-Rohrstrecken erforderlich. Bild 2-46 zeigt empfohlene Einlauf- und Auslaufstrecken für verschiedene Randbedingungen am Einbauort.

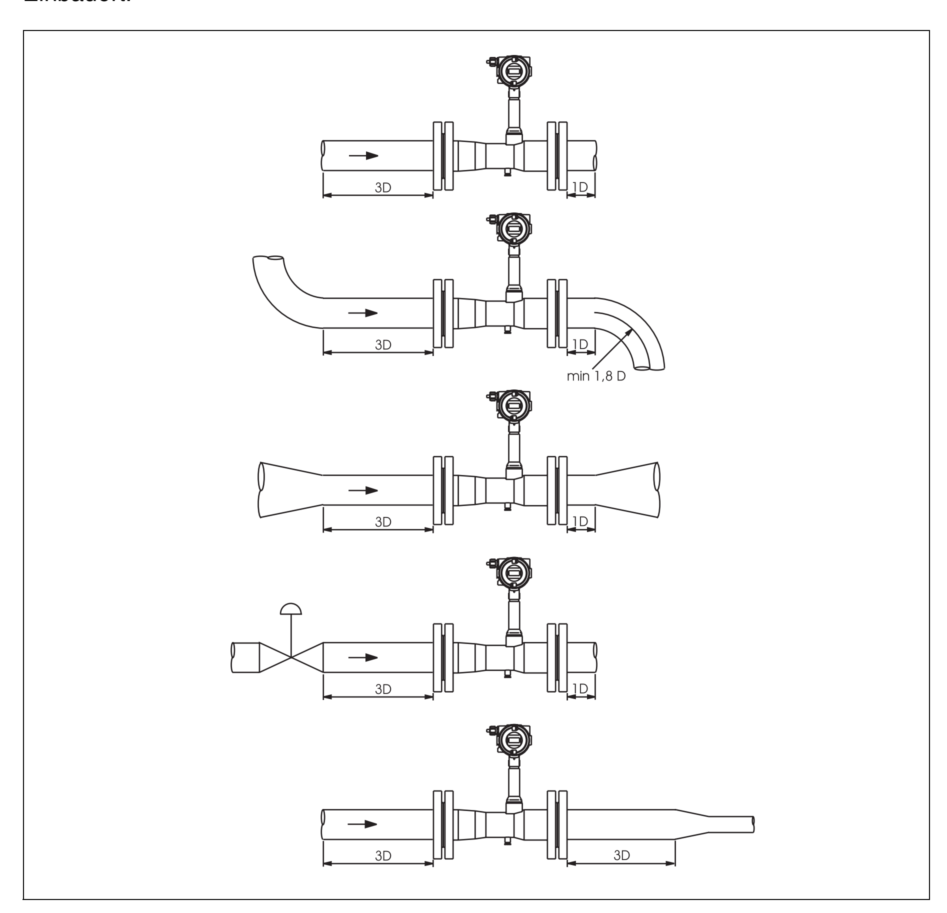


Bild 2-46: Ein- und Auslaufstrecken

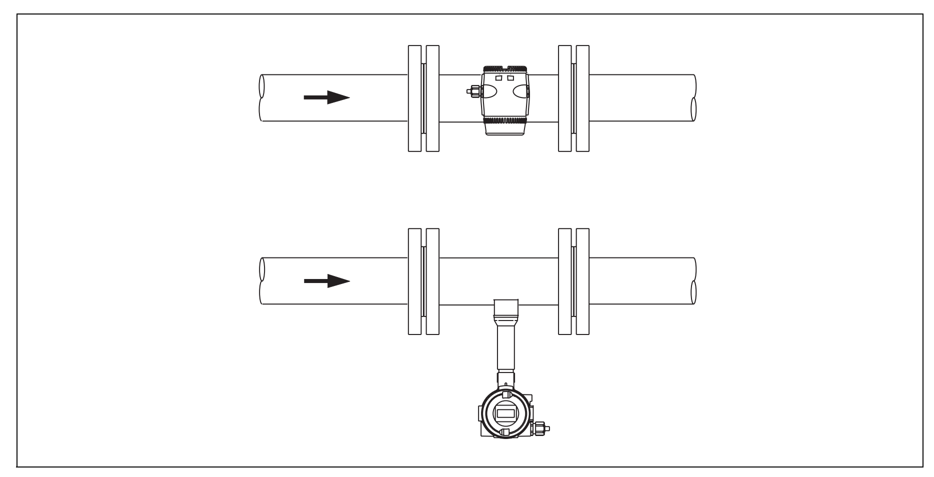


Bild 2-47: Einbaulage bei hohen Medientemperaturen

Multivariable Geräte

Geräte, die mehr als eine physikalische Größe erfassen, werden auch als multivariable Messgeräte bezeichnet. Sie können optional mit einem Pt 100 zur integrierten Temperaturmessung direkt im Sensor ausgerüstet werden.

Zur Umrechnung auf Norm- und Masseeinheiten kann die Temperaturmessung unter Umständen völlig ausreichend sein, z. B. bei Sattdampf oder bei Gasen, wenn der Druck konstant gehalten werden kann.

Kompensation von Prozesseinflüssen

Integrierte Temperaturmessung

Die Erfassung von Temperatur und Durchfluss am gleichen Ort bietet erhebliche Vorteile:

- Hohe Genauigkeit durch günstige Positionierung des Temperaturfühlers
- Keine Verdrahtung
- Kurze Ansprechzeit

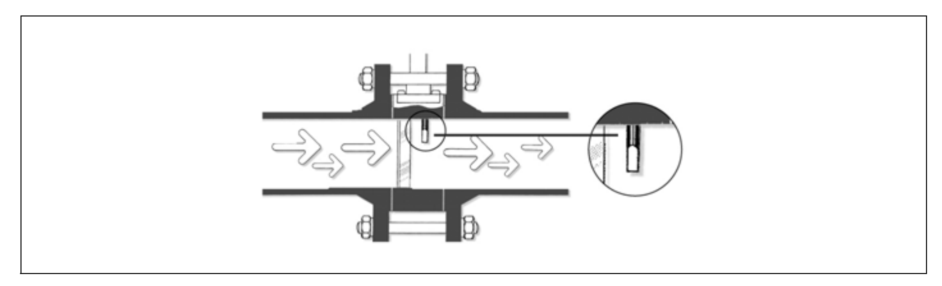
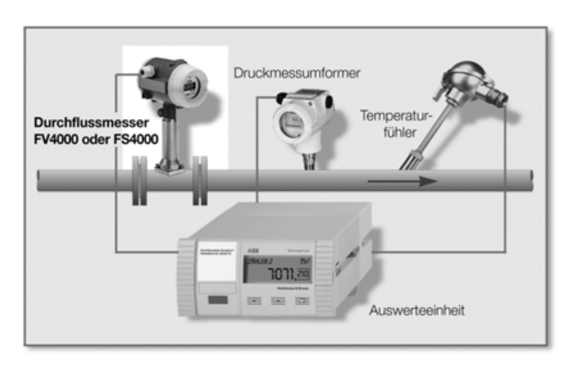


Bild 2-48: Sensor für Durchfluss und Temperaturmessung

Druck- und Temperaturkompensation

Sind die Prozessbedingungen zusätzlich durch Druckschwankungen wechselhaft oder es handelt sich um überhitzten Dampf, reicht die integrierte Temperaturmessung nicht aus, um den Gas-Durchfluss in Masse- oder Normeinheiten bzw. den Dampf-Masse-Durchfluss exakt darstellen zu können. Hier sind Wirbel- und Drall-Durchflussmesser in Verbindung mit Messrechnern für den Einsatz prädestiniert. Die Speisung erfolgt über die Auswerteeinheiten – der Verdrahtungsaufwand wird erheblich reduziert.

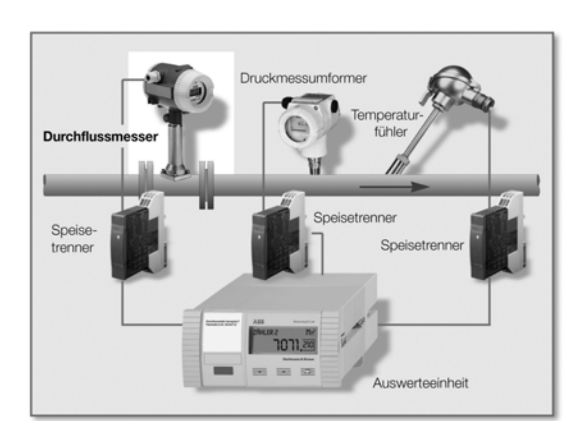


Eingesetzte Komponenten

- **Durchflussmesser** (Wirbel oder Drall)
- **Druckmessumformer** für Absolutdruck
- **Widerstandsthermometer,** optional mit eingebautem Fühlerkopfmessumformer
- **Auswerteeinheit**

Messung im Ex-Bereich

Die Signale müssen durch Speisetrenner eigensicher gespeist werden.



2.2 Durchflussmesser

2.2.1 Durchflussmessgeräte nach dem Wirkdruck-Messverfahren

Unter Kapitel 1.2.5 waren die Beziehungen zwischen dem an einer Rohreinschnürung entstandenen Druckabfall Δp und dem Volumendurchfluss q_v dargestellt.

Dieses physikalische Phänomen ist die Grundlage für die Wirkdruckmessung, bei der Drosselgeräte in der voll durchströmten Rohrleitung die Druckdifferenz oder den Wirkdruck hervorrufen.

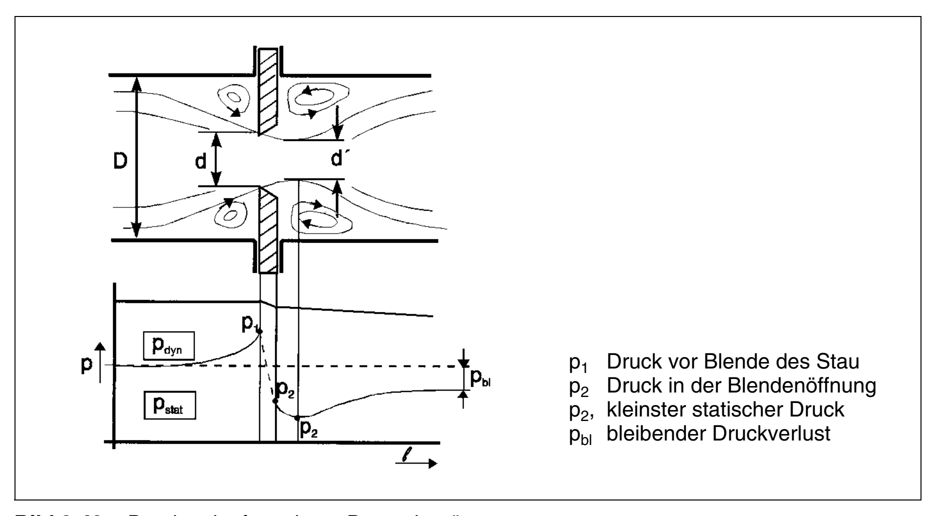


Bild 2-49: Druckverlauf an einem Drosselgerät

Bild 2-49 zeigt die Umwandlung der Energieformen. In der Drosselstrecke nimmt als Folge der Geschwindigkeitserhöhung die kinetische Energie (dynamischer Druck p_{dyn}) zu, die Druckenergie (statischer Druck p_{Stat}) ab. Der Wirkdruck ergibt sich dann aus der Differenz zwischen dem statischen Druck vor der Drossel und dem in der Drossel bzw. kurz hinter dieser. Hinter dem Drosselorgan kommt es infolge der Geschwindigkeitsabnahme zur Rückwandlung der Energieformen vermindert um den Energie- oder Druckverlust p_{bl}.

Das Wirkdruck-Messverfahren ist eine universell anwendbare Methode für die Durchflussmessung. Wirkdruck-Messgeräte arbeiten bei Gasen und Flüssigkeiten selbst bei extrem hohen Drücken und Temperaturen. Die Geräte wurden in jahrzehntelanger Forschungsarbeit optimiert und die Ergebnisse in Normungsverfahren vereinheitlicht. Maßgebend sind die ISO-Norm 5167 und die deutsche Version DN 1952, mit deren Hilfe die exakten Berechnungen durchgeführt werden können. Diesen Quellen entnimmt man die Durchflussgleichungen für Masse und Volumendurchfluss:

$$q_m = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho} \tag{2.6}$$

$$q_m = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \tag{2.7}$$

Drei Begriffe werden an dieser Stelle neu eingeführt; das sind der Vorgeschwindigkeitsfaktor E, der Durchflusskoeffizient C und die Expansionszahl ε**.**

Der Vorgeschwindigkeitsfaktor E

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} = \frac{D^2}{\sqrt{D^4 - d^4}} \tag{2.8}$$

berücksichtigt das Durchmesserverhältnis $\beta = \frac{d}{D} = \sqrt{m}$

E dient aber vor allem als Verknüpfungsglied des Durchflusskoeffizienten C mit der Durchflusszahl α α wurde in der ISO-Norm durch C ersetzt.

Der Durchflusskoeffizient C ist abhängig vom Durchmesserverhältnis β, von der Reynoldschen Zahl Re, von der Art des Drosselorgans und der Druckentnahme und schließlich von der Reibung durch die Rohrrauhigkeit. Die empirisch ermittelten Werte sind in Kurven und Tabellen festgehalten. Die Expansionszahl ε berücksichtigt die Dichteänderung von Gasen und Dämpfen durch den Druckabfall innerhalb der Drosselstrecke. Auch für ε gibt es Tabellen und Kurven. Die VDI/VDE-Richtlinien 2040 ergänzen die genannten Berechnungsunterlagen.

Bauform der Drosselgeräte

Unterschiedliche Bauformen gestatten eine optimale Anpassung an die Betriebsbedingungen und an die Anforderungen des Betreibers. Ein wichtiger Gesichtspunkt ist beispielsweise der Druckverlust, der in der Regel möglichst gering sein soll. Oder die Länge der geraden Ein- und Auslaufstrecken, die bei Venturirohr relativ kurz sein darf. Sicherlich sind auch die Kosten von entscheidender Bedeutung.

Folgende Drosselgeräte wurden in die Norm aufgenommen.

Blenden	**Blende** mit Eck-Druckentnahme
	Blende mit D und D/2-Druckentnahme
	Blende mit Flansch-Druckentnahme
Düsen	ISA-1932-**Düse**
	Langradius-Düse
Venturirohre	klassisches **Venturirohr**
	Venturidüse

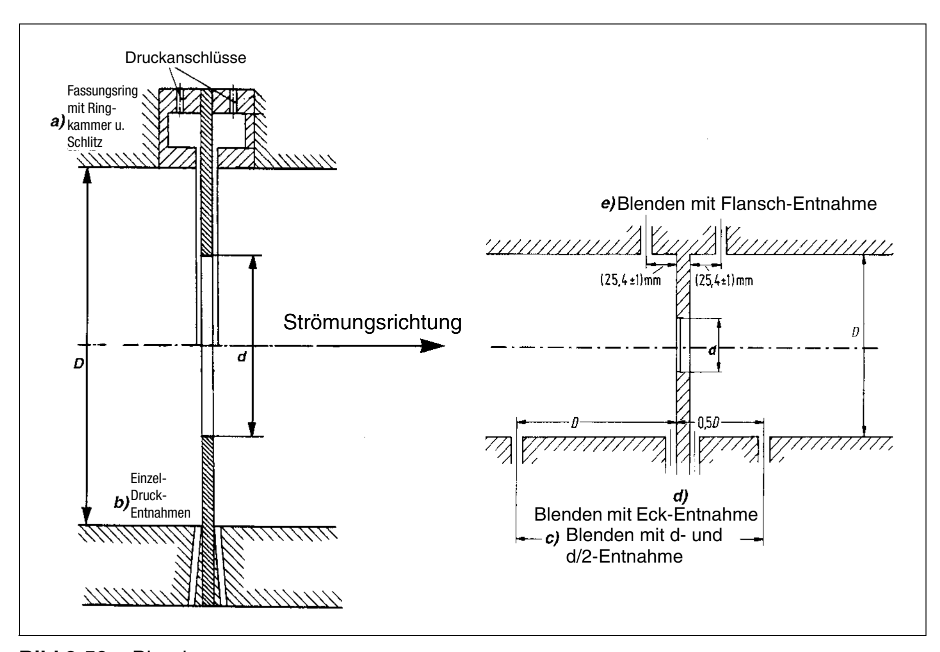


Bild 2-50: Blenden

Die preisgünstigste Version ist die Blende. Bild 2-50 zeigt die Eck-Druckentnahme in (b/d) als Einzel-Druckentnahme und in (a) über Ringkammern. Die D- und D/2-Entnahme ist bei (c) zu sehen. Die Flansch-Druckentnahme (e) mit Nennabständen von 25,4 mm zur Blende, geschieht durch Bohrungen durch die Flansche. Sie wird häufig kombiniert mit der Ringkammer (a).

Düsen haben geringere Druckverluste, verlangen aber eine präzise Fertigung. Bild 2-51 (b) zeigt die ISA 1932 Düse und bei (a) deren Einbau mit Eck-Druckentnahme (unten) und mit Ringkammer (oben). Langradius-Düsen (c/d) gibt es für kleine und große Durchmesser. Einbau wie bei (a) gezeigt.

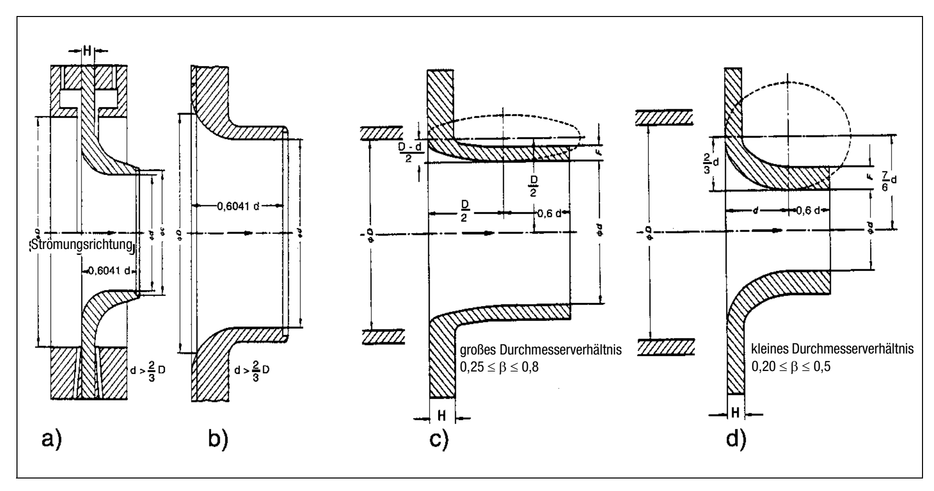


Bild 2-51: Düsen

Venturirohre und Venturidüsen zeichnen sich durch einen sehr kleinen Druckverlust aus. Beide sind auch in verkürzter Bauform verfügbar. Dass der Druckverlust bei der Beurteilung der verschiedenen Drosselgeräte eine wichtige Rolle spielt, lässt sich anhand des Diagramms (Bild 2-53) erklären.

Druckverlust bedeutet Energieverlust und größere Pumpenleistung.

Bild 2-52: Klassisches Venturirohr und Venturidüse

Vergleicht man die Spanne der Einsatzmöglichkeiten aus Tab. 2-4, so fällt die Universalität der Blenden auf mit dem Nachteil des großen Druckverlustes. Wichtig bei der Blende ist die bleibende Kantenschärfe. Deshalb ist die Blende gegenüber Verschmutzung und Abrieb empfindlich.

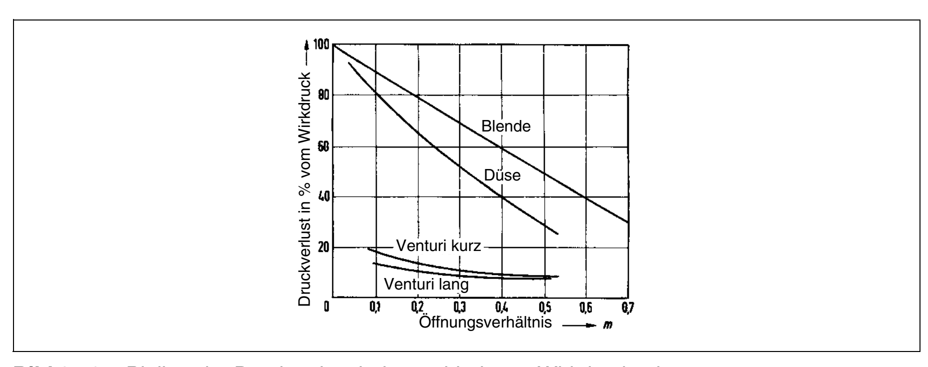


Bild 2-53: Bleibender Druckverlust bei verschiedenen Wirkdruckgebern

	Blenden			Düsen		Venturi	
	Eck-Druck-entnahme	Flansch-Druck-entnahme	D und D/2-Druck-entnahme	ISA 1932	Lang-radius	Venturi-rohr	Venturi-düse
d_{min} [mm]	12,5	12,5	12,5	15	10	20	50
D_{min} [mm]	50	50	50	50	50	50	65
D_{max} [mm]	1000	760	760	500	630	1200	500
β_{min}	0,23	0,20	0,20	0,3	0,2	0,3	0,32
β_{max}	0,80	0,75	0,75	0,8	0,8	0,75	0,78
$Re_{D,\,min}$	$5 \cdot 10^3$ ...$20 \cdot 10^3$	$2{,}5 \cdot 10^3$ ...$540 \cdot 10^3$	$2{,}5 \cdot 10^3$ ...$540 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	10^4	$2 \cdot 10^5$	$1{,}5 \cdot 10^5$
$Re_{D,\,max}$	10^8	10^8	10^8	10^7	$2 \cdot 10^7$	10^6	$2 \cdot 10^6$

Tab. 2-4: Anwendungsgrenzen der Drosselgeräte

Es lässt sich leicht nachvollziehen, dass ein derart durchforschtes Sachgebiet wie die Wirkdruckmessung auch Sonderaufgaben erfüllen kann. So setzt man für Fluide mit Feststoffanteilen Segmentblenden ein, die in der Messzone nur einseitig abblenden. Bei hochviskosen Messstoffen kann man mit der Viertelkreisdüse auf kleinste Reynolds-Zahlen von 50 kommen. Düsen mit einem Öffnungsdurchmesser von 0,6 mm sind in der Lage, Flüssigkeitsdurchflüsse bis zu 2 l/h zu messen. Diese Düsen bilden mit dem Wirkdruck-Messumformer meistens eine Einheit. Und natürlich können die Tabellenwerte auch nach oben bis zu Nennweiten von 2000 und größer überschritten werden.

Anforderungen an den Einbau

Das Wirkdruck-Messverfahren kann nur bei eindeutigen Strömungsverhältnissen einwandfrei arbeiten. Ungleichmäßige Geschwindigkeitsprofile nach Strömungsstörern verhindern die rotationssymmetrische Strömungseinschnürung im Drosselgerät und verändern dadurch den Wirkdruck. Deshalb muss das Drosselgerät zwischen zwei geraden zylindrischen Rohrstrecken eingebaut sein, in denen sich keine Hindernisse oder Rohrabweichungen befinden. Innerhalb dieser Rohrstrecke bildet sich ein messgerechtes Geschwindigkeitsprofil aus. Tab. 2-5 gibt die Empfehlungen nach DIN 1952 für die erforderlichen Rohrstrecken wieder.

	Blenden, Düsen, Venturidüsen				Klassisches Venturirohr		
	Durchmesserverhältnis β				Durchmesserverhältnis β		
	0,2	0,4	0,6	0,8	0,3	0,5	0,75
Einfacher 90°-Krümmer oder T-Stück	10	14	18	46	0,5	1,5	4,5
2 oder mehr 90°-Krümmer in verschiedenen Ebenen	(34)	(36)	48	80	0,5	(8,5)	(29,5)[1)]
Diffusor von 0,5 D auf D über eine Länge von 1...2 D	16	16	22	54			
Diffusor von 0,75 D auf D über eine Länge von 1 D					1,5	2,5	6,5
Schieber voll geöffnet	12	12	14	30	1,5	3,5	5,5
Auslaufseite	4	6	7	8	4	4	4
[1)] Derartige Störungen können auch nach 40 D nachwirken, daher die Angaben in Klammern.							

Tab. 2-5: Erforderliche störungsfreie gerade Rohrstrecken. Zahlenwerte als Vielfache von D

Ein strömungstechnisch schwieriger Fall ist die Drallströmung, bei der sich das Fluid wendelförmig durch die Rohrleitung bewegt. Die empfohlenen Leitungslängen reichen bei weitem nicht aus für eine Strömungsberuhigung. Deshalb muss hier ein Strömungsgleichrichter eingesetzt werden. Mit einem Strömungsgleichrichter kann man auch die empfohlenen Rohrlängen bei anderen Störern verkürzen.

Messanordnungen

Die komplette Durchflussmesseinrichtung besteht aus folgenden Teilen:

a) Drosselgerät als Wirkdruckgeber
b) Anschlussarmatur für das Drosselgerät mit Schutzeinrichtungen
c) Wirkdruckleitung
d) Anschlussarmatur für Wirkdruck
e) Wirkdruckmessumformer
f) Kondensgefäß
g) Speisegerät für Hilfsenergie

Ausrüstung der Messeinrichtung und Anordnung der Bauteile werden durch den Anwendungsfall bestimmt. Die Mindestforderung für jede Messstelle ist die Wirkdruckleitung als Druckübermittlungsorgan zwischen Drosselgerät und Differenzdruck-Messumformer. Beide Wirkdruckleitungen bekommen je ein Absperrventil (b) hinter dem Druckanschluss. Dem Schutz des Differenzdruckmessumformers (e) dient eine Ventilkombination (d) aus drei bzw. fünf Ventilen vor dem Messumformer, die diesen absperren und vor einseitiger Druckaufschaltung schützen soll.

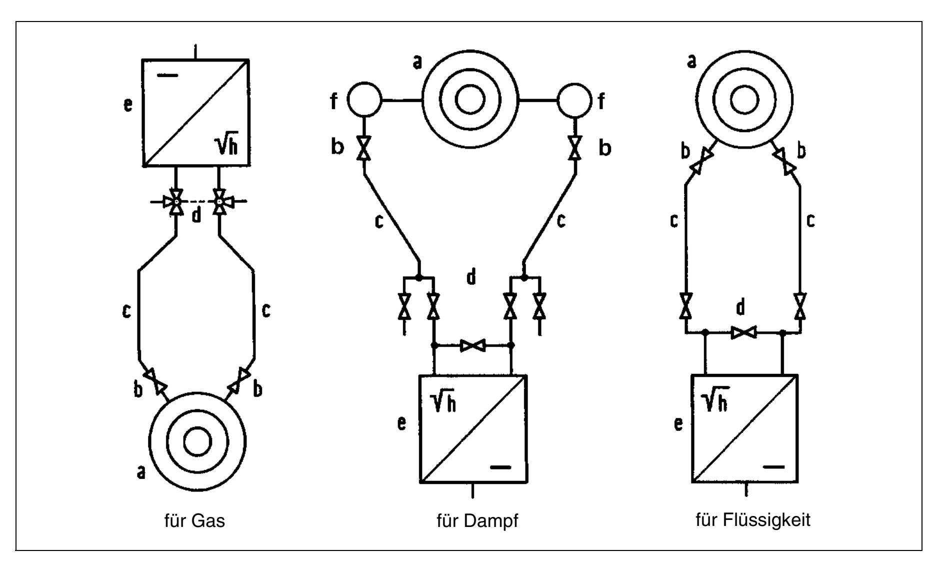


Bild 2-54: Wirkdruck-Messanordnung

Wird die Wirkdruckmessung zur Gasmessung eingesetzt, so ist der Messumformer oberhalb anzuordnen, damit eventuelle Feuchtigkeitsanteile nicht in die Wirkdruckleitung gelangen können. Umgekehrt sollen Gasanteile bei der Flüssigkeitsmessung nicht in die Wirkdruckleitung geraten. Deshalb ist hier der Wirkdruckgeber oberhalb aufzubauen. Für die Dampfmessung füllt man die Wirkdruckleitung mit Kondensat, das im Kondensgefäß (f) entsteht.

Es gibt eine Reihe von Messanordnungen, die auch außergewöhnliche Einsatzfälle berücksichtigen. So zum Beispiel verhindern Trenngefäße, dass aggressive Messstoffe in den Messumformer gelangen. Die VDE/VDI-Richtlinie 3512 liefert die Anweisungen für derartige Sonderfälle.

Wirkdruck-Messumformer

Der Wirkdruckmessumformer oder **Differenzdruckmessumformer** hat folgende Aufgaben:

a) er soll einem hohen statischen Druck widerstehen, der in der Rohrleitung herrscht

b) er soll sehr empfindlich sein, um bei kleinstem Wirkdruck zu arbeiten, denn mit dem Wirkdruck steigt der Druckverlust

c) er soll gegenüber aggressiven Messstoffen chemisch resistente Werkstoffe haben

d) er soll den Wirkdruck in ein elektrisches analoges oder digitales Einheitssignal wandeln

e) er soll radizieren und damit eine direkte, lineare Proportionalität zwischen Durchfluss und Ausgang erreichen

f) er soll einfach zu bedienen sein und selbstüberwachende Funktion haben

g) außerdem erwartet man Kommunikationsfähigkeit im Sinne der SMART- oder Feldbus-Technik (PROFIBUS PA, FOUNDATION Fieldbus).

h) selbstverständlich ist er störfest (EMV) und explosionsgeschützt.

Innerhalb der Reihe 2600T liefert ABB Geräte, die alle genannten Aufgaben erfüllen.

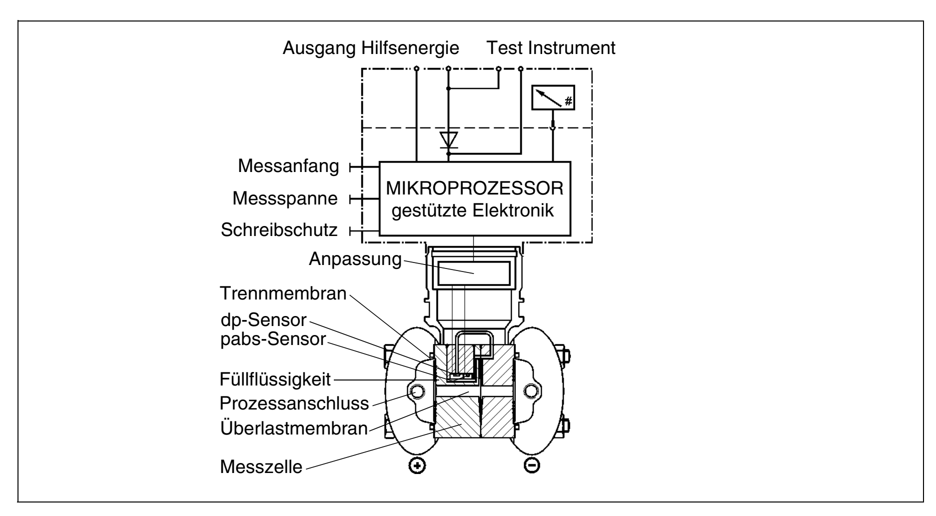


Bild 2-55: Funktionsschema

Der Messumformer 265DS ist modular aufgebaut und besteht aus dem Messwerk mit integrierter Anpasselektronik und der Elektronik mit Bedienteil.

Dieser Messumformer ist ein Multisensor-Gerät zur Messung von Differenzdruck und Absolutdruck. Die komplett verschweißte Messzelle ist ein Zweikammersystem mit innenliegender Überlastmembran und einem innenliegenden Silizium-Absolutdruck-

sensor sowie einem Silizium-Differenzdrucksensor. Der Absolutdrucksensor, der nur vom plusseitigen Druck beaufschlagt wird, misst den Prozessdruck und liefert die Daten für eine fast vollständige Kompensation des statischen Druckeinflusses. Über ein Kapillarrohr ist der Differenzdrucksensor mit der Minusseite der Messzelle verbunden. Der anstehende Differenzdruck (dp)/Absolutdruck (pabs) wird über die Trennmembranen und die Füllflüssigkeit auf die Messmembran des Silizium-Differenzdrucksensors übertragen.

Eine minimale Auslenkung der Siliziummembran verändert die Ausgangsspannung des Abgriffsystems. Diese druckproportionale Ausgangsspannung wird linearisiert, temperaturkompensiert und durch Anpasselektronik und Elektronik in ein elektrisches Signal 4...20 mA/HART, PROFIBUS PA oder FOUNDATION Fieldbus umgewandelt.

Damit einseitige Überlastungen bis zum vollen Nenndruck nicht zu einer Schädigung des Messwerkes führen, ist es mit einer Überlastmembran ausgestattet. Bei Differenzdrücken innerhalb der Messgrenzen hat die Überlastmembran keinen Einfluss auf die Messeigenschaften. Erst nach Überschreiten der Messgrenzen verschiebt sich die Überlastmembran aus der Mittelstellung bis die Trennmembran zur Anlage kommt. Der auf den Sensor wirkende Druck wird dadurch begrenzt.

Für die Bedienung „vor Ort“ steht eine Bedieneinheit zur Verfügung, die aus zwei Tastern zur Einstellung von Messanfang und Messende sowie einem Schreibschutzschalter besteht. In Verbindung mit einem eingebauten LCD-Anzeiger ist der Messumformer, unabhängig von dem gewählten Kommunikationsprotokoll, komplett über die „örtliche Bedieneinheit“ von außen konfigurierbar und parametrierbar. Der kleinste Bereichsendwert ist 0,5 mbar, der größte 100 bar. Die Grundgenauigkeit liegt unter 0,04 % der eingestellten Spanne. Die messstoffberührten Teile werden in der Werkstoffauswahl dem chemischen Verhalten des Messstoffes angepasst.



Bild 2-56: Differenzdruckmessumformer 265DS

Wenn sich bei der Durchflussmessung nach dem Wirkdruckverfahren die Dichte des Messstoffes durch Druck- und Temperaturschwankungen ändert, empfiehlt es sich, zumindest bei der Messung von Gas oder Dampf, zusätzlich Prozessdruck und -temperatur zu messen und eine rechnerische Zustandskorrektur durchzuführen. Dadurch erhält man auch bei schwankenden Betriebsgrößen eine zuverlässige Messung des Masse- bzw. Normvolumendurchflusses.

Auch für diese komplexe Aufgabe, die in der Vergangenheit durch den Einsatz je eines Differenzdruck-, Absolutdruck- und Temperaturmessumformers und eines zusätzlichen Rechengerätes realisiert werden musste, stehen mit den multivariablen Messumformern 267CS oder 269CS Geräte zur Verfügung, die alle Messgrößen direkt erfassen und überdies auch die rechnerische Zustandskorrektur in einem einzigen Gerät durchführen.

Zur Differenzdruck- und Druckmessung wird die gleiche Messzelle verwendet, die bereits bei 265DS beschrieben wurde. Lediglich die Elektronik wurde erweitert, um auch die Prozesstemperaturmessung mit einem externen Temperatursensor zu ermöglichen.

Bei der Zustandskorrektur wird nicht nur die Dichte für die aktuellen Prozessbedingungen berechnet. In Abhängigkeit vom verwendeten Wirkdruckgebertyp, der Reynoldszahl und des Durchmesserverhältnisses, wird der Durchflusskoeffizient ermittelt, die thermische Ausdehnung von Rohrleitung und Wirkdruckgeber kompensiert und bei Gasen zusätzlich die Expansionszahl und die Realgasfaktoren mit den jeweils aktuellen Prozessbedingungen neu berechnet. Man spricht hier von einer dynamischen Zustandskorrektur, die ein Höchstmaß an Genauigkeit gewährleistet.

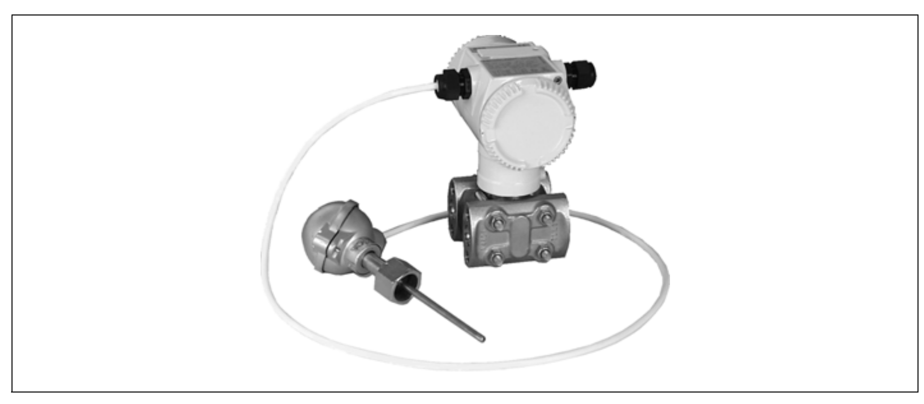


Bild 2-57: Multivariabler Messumformer 269CS

2.2.2 Schwebekörper-Durchflussmesser

Einfach und relativ genau lässt sich der Durchfluss von Gasen und Flüssigkeiten mit dem Schwebekörper-Durchflussmesser bestimmen. Ein senkrecht gestelltes Rohr, das sich nach oben konisch erweitert, wird von unten nach oben durchströmt. Der aufwärtsströmende Messstoff hebt den im Rohr befindlichen Schwebekörper so lange, bis der ringförmige Spalt zwischen Schwebekörper und Rohrwand so groß ist, dass die auf den Schwebekörper wirkenden Kräfte im Gleichgewicht sind und damit der Schwebezustand erreicht ist.

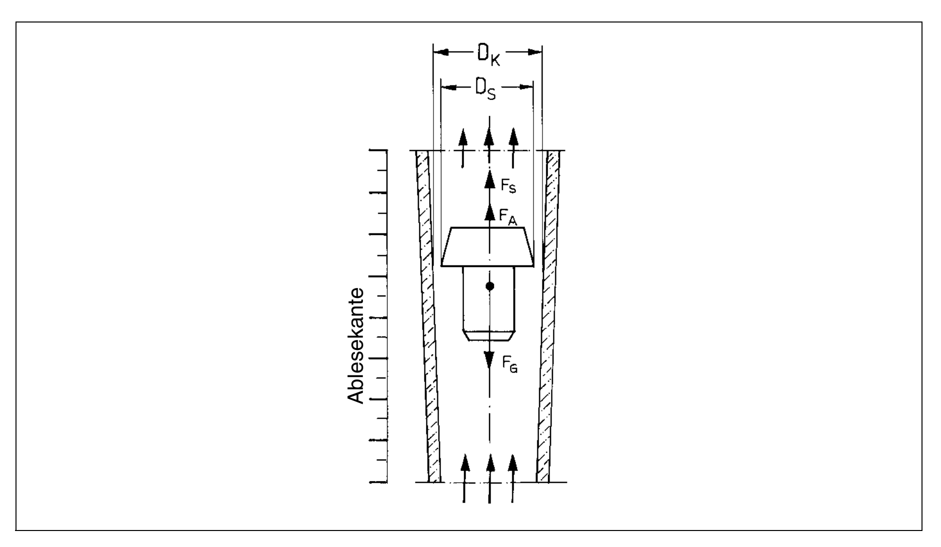


Bild 2-58: Prinzip des Schwebekörper-Durchflussmessers

Drei Kräfte wirken auf den Schwebekörper (Bild 2-58). Nach unten ist die Gewichtskraft F_G gerichtet.

$$F_G = V_s \cdot \rho_s \cdot g \tag{2.8}$$

Nach oben greifen zwei Kräfte an:
Der Auftrieb F_A und die Kraft des Strömungswiderstandes F_S:

$$F_A = V_s \cdot \rho_m \cdot g \tag{2.9}$$

$$F_s = c_w \cdot A_s \cdot \frac{\rho_m \cdot v^2}{2} \tag{2.10}$$

V_s: Volumen des Schwebekörpers
m_s: Masse des Schwebekörpers
ρ_s: Dichte des Schwebekörpers
ρ_m: Dichte des Messstoffes
c_w: Widerstandsbeiwert
A_s: Querschnittsfläche des Schwebekörpers an der Ablesekante
v: Fließgeschwindigkeit des Messstoffes
D_k: Konus-Innendurchmesser an der Ablesestelle
D_s: Durchmesser des Schwebekörpers an der Ablesekante

Für den Gleichgewichts-oder Schwebezustand gilt:

$$F_G = F_A + F_S \qquad (2.11)$$

Der Durchfluss ist:

$$q_v = v \cdot A = v \frac{\pi}{4} (D_k^2 - D_s^2) \qquad (2.12)$$

Der Widerstandsbeiwert c_w wird in die Durchflusszahl überführt.

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{c_w}} \qquad (2.13)$$

α ist abhängig von der geometrischen Form des Messrohres und des Schwebekörpers, vor allem vom Durchmesserverhältnis. α beinhaltet auch die Reibung. Als empirisch ermittelter Wert erscheint er in gerätebezogenen Kennlinien, die in die Basisberechnung einbezogen werden.

Unter Berücksichtigung der vorgenannten Gleichungen lässt sich die allgemeine Durchflussgleichung für Schwebekörper-Durchflussmesser aufstellen.

Volumendurchfluss:

$$q_v = \frac{\alpha}{\rho_m} D_s \sqrt{g \cdot m_s \cdot \rho_m \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_s}\right)} \qquad (2.14$$

Massedurchfluss:

$$q_m = \alpha \cdot D_s \sqrt{g \cdot m_s \cdot \rho_m \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_s}\right)} \qquad (2.15)$$

Der dem Durchfluss zur Verfügung stehende Ringspalt ändert sich wegen der Konizität des Messrohres mit der Höhenstellung des Schwebekörpers. Somit liefert die Höhen-

lage eine Aussage über den Durchfluss. Bei Verwendung eines Glasmessrohres kann daher der Messwert direkt an einer Skala abgelesen werden.

Verglichen mit der Wirkdruckmessung gibt es physikalisch eine Analogie, die sich durch gleichartige Berechnungsverfahren ausdrückt. Der gravierende Unterschied ist mechanischer Natur, denn bei Wirkdruck-Messverfahren bleibt der durchströmende Querschnitt konstant und der Wirkdruck ändert sich mit dem Durchfluss, während sich beim Schwebekörperprinzip der Querschnitt anpasst und die Druckdifferenz gleich bleibt.

Schwebekörper

Eine wichtige Voraussetzung für die Messung ist die eindeutige Zentrierung des Schwebekörpers im Messrohr. Drei Methoden haben sich bewährt:

1. Durch Kerben am Schwebekörperkopf wird dieser vom strömenden Messstoff zur Rotation gezwungen und zentriert sich selbst. Dieses Prinzip lässt sich nicht bei allen Schwebekörperformen anwenden. Außerdem entsteht eine starke Abhängigkeit von der Viskosität des Messstoffes.

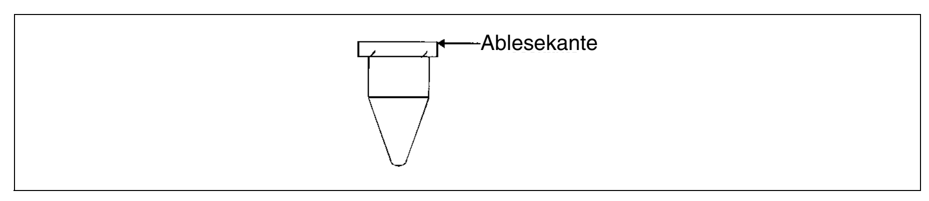


Bild 2-59: Rotierender Schwebekörper

2. Der Schwebekörper wird geführt, und zwar durch drei Rippen oder drei Flächen (Kugelschwebekörper), die im Gegensatz zum Konus achsparallel verlaufen.

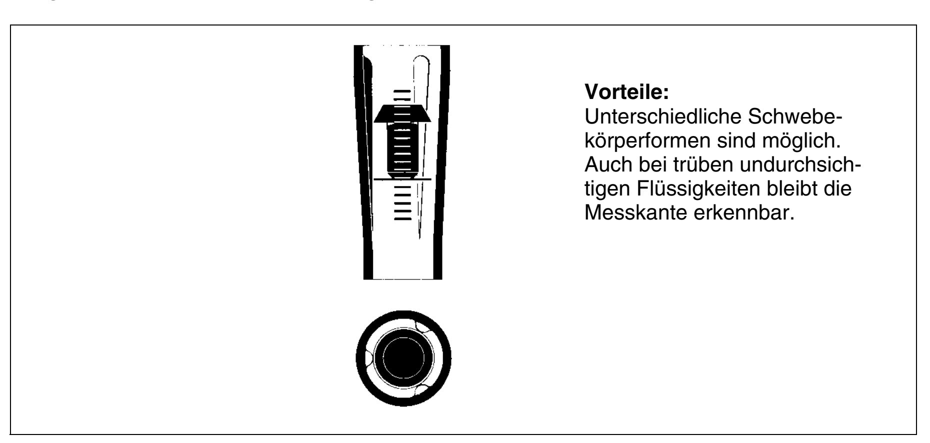
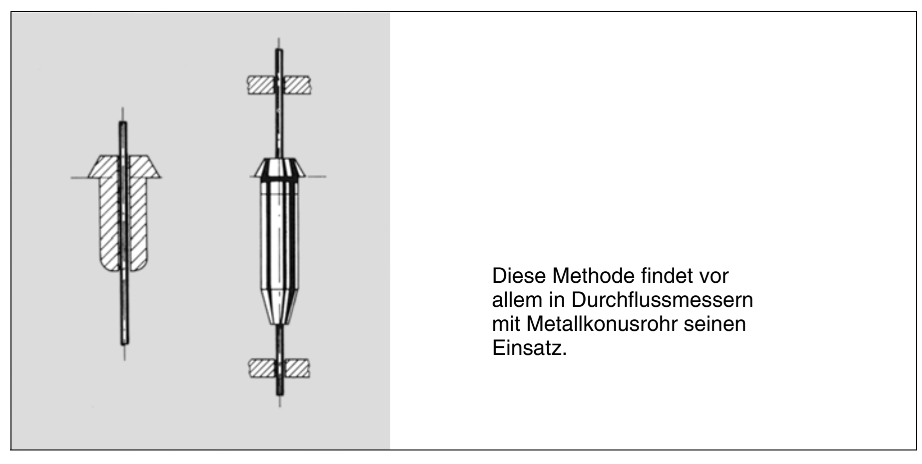


Bild 2-60: Schwebekörperführung in 3 Rippen oder 3 Flächen

3. Mit Hilfe einer Stange in der Rohrachse wird der Schwebekörper geführt.



Diese Methode findet vor allem in Durchflussmessern mit Metallkonusrohr seinen Einsatz.

Bild 2-61: Schwebekörper mit Führungsstange

Es gibt eine große Zahl unterschiedlich ausgebildeter Schwebekörper. Gewicht, Form und Werkstoff werden durch den Einsatzfall bestimmt.

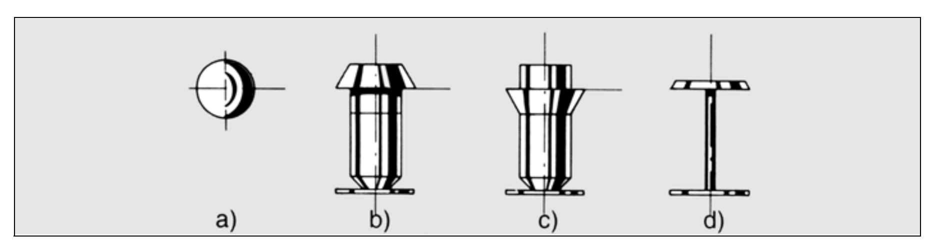


Bild 2-62: Schwebekörperformen

a) Kugelschwebekörper
b) Viskositätsunabhängiger Schwebekörper
c) Viskositätsbeeinflusster Schwebekörper
d) Schwebekörper für niedrigen Druckverlust

Im Bild 2-62 sind die am häufigsten eingesetzten Schwebekörper dargestellt.

Der Kugelschwebekörper ist das Messorgan des Kleindurchflussmessers. Sein Gewicht lässt sich durch die Wahl unterschiedlicher Werkstoffe bestimmen. Formänderungen sind nicht möglich.

Daher ist die Durchflusszahl festgelegt. Die Kugelform ist verantwortlich für den Viskositätseinfluss.

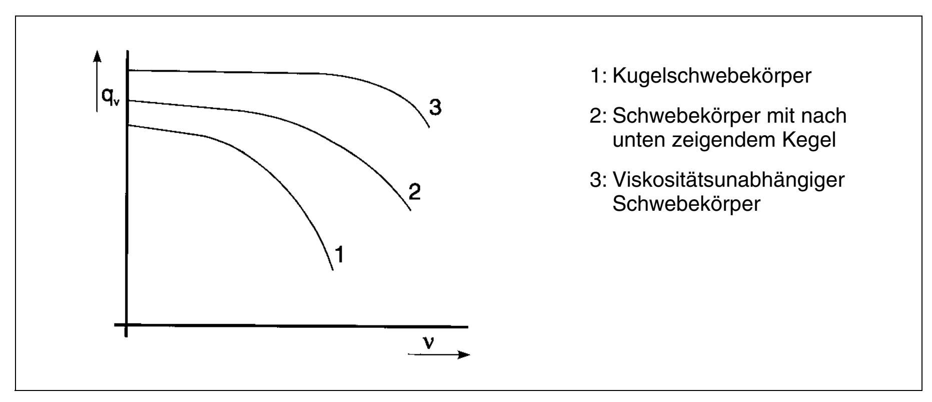


Bild 2-63: Viskositätseinfluss bei unterschiedlichen Schwebekörperformen

Bild 2-63 verdeutlicht den Viskositätseinfluss auf die Durchflussanzeige. Hier fällt die Kurve 1 für den Kugelschwebekörper besonders ins Auge, weil sie keinen linearen Anteil besitzt. Das bedeutet, dass jede Viskositätsänderung Abweichungen bringt. Man muss bedenken, dass bei vielen Fluiden schon geringste Temperaturwechsel die Viskosität verändern.

Der Schwebekörper mit dem nach unten zeigenden Kegel (Bild 2-59 und Bild 2-62c) wird weniger in Kleindurchflussmessern als in den größeren Varianten verwendet. Der lineare Kurvenanteil im Bild 2-63/2 ist relativ klein. Hier beweist sich die Aussage für den rotierenden Schwebekörper. Wesentlich unempfindlicher ist die Konstruktion aus Bild 2-62b. Die zugehörige Kurve Bild 2-63/3 hat einen großen linearen Anteil. Ein solches Gerät verkraftet relativ große Viskositätssprünge, misst bei gleicher Größe allerdings 25 % weniger als das vorher beschriebene. Der größere Teil der von **ABB** hergestellten Schwebekörper-Durchflussmesser enthält den viskositätsunempfindlichen Schwebekörper.

Schließlich gibt es auch noch einen sehr leichten Schwebekörper (Bild 2-62d) mit relativ geringem Druckverlust. Diese Version kommt mit geringen Vordrücken aus, deshalb ist sie besonders bei der Gas-Durchflussmessung beliebt.

Druckverlust

Druckverluste entstehen erstens gewollt am Schwebekörper, denn die für den Messeffekt erforderliche Energie wird als Druckverlust dem strömenden Fluid entnommen, und zweitens durch die konstruktionsbedingten Einschnürungen in der Gerätearmatur.

Der Druckverlust am Schwebekörper ist abhängig von seinem größten Außendurchmesser und von seinem Gesamtgewicht und ist somit, unabhängig von seiner Höhenstellung im Messrohr, konstant. Der durch die Einschnürungen der Armatur verursachte Druckverlust steigt mit zunehmender Fließgeschwindigkeit quadratisch an.

Der entstehende Gesamtdruckverlust erfordert einen Mindestvordruck.

Dimensionierungsverfahren

Für alle Schwebekörper-Durchflussmesser gibt es Tabellen mit Messbereichsangaben für Wasser- und Luftdurchfluss, in denen die empirisch ermittelten α-Werte schon enthalten sind. Deshalb ist eine aufwendige Neuberechnung nicht nötig. Bei anderen Messstoffen als Wasser und Luft muss lediglich eine Umrechnung auf die äquivalenten Tabellenwerte erfolgen. Für glattkonische (Metallkonus) und Glasmessrohre mit Dreirippenführung gilt bei Flüssigkeiten

$$q_{vwasser} = q_{v1} \sqrt{\frac{(\rho_s - 1) \cdot \rho_1}{(\rho_{s1} - \rho_1) \cdot 1}} \tag{2.16}$$

q_{v1} = Volumendurchfluss des Messstoffes
q_{m1} = Massedurchfluss des Messstoffes
ρ_s = Dichte des Schwebekörpers, i.d.R. 8,02 g/cm^3 für nicht rostenden Stahl
ρ_{s1} = Dichte des Schwebekörpers, der verwandt wird
ρ_{s1} = nur in Sonderfällen

ρ_n = Dichte des Messstoffes
ρ_1 = Dichte von Wasser, hier = 1 g/cm^3

$$q_{vwasser} = q_{m1} \sqrt{\frac{\rho_s - 1}{\rho_1 \cdot 1(\rho_{s1} - \rho_1)}} \tag{2.17}$$

Zur Berechnung von Glasmessrohren mit Dreiflächenmessrohren und Kugelschwebekörpern gibt es ein ähnliches Dimensionierungsverfahren.

Beispiel:

Messstoff	**Ammoniak, flüssig**
Massedurchfluss qm	1500 kg/h
Dichte ρ	0,68 kg/l
dyn. Viskosität η	0,23 mPas
Betriebsdruck	15 bar
Betriebstemperatur	20 °C

nach Gleichung (2.17) gilt:

$$q_{vwasser} = 1500 \sqrt{\frac{8,02 - 1}{0,68 \cdot 1(8,02 - 0,68)}}$$

$$q_{vwasser} = 1779 \text{ l/h}$$

Mit diesem Wasser-Wert kann man jetzt in der Tabelle des ausgewählten Gerätes die **Gerätegröße** heraussuchen.

Zur Umrechnung auf äquivalente Tabellenwerte für Luft muss zuerst die auf Luft bezogene relative Dichte ρ_B berechnet werden:

$$\rho_{nLuft} = 1,293\ [kg/m^3]$$

$$\rho_B = \frac{\rho_n}{1,293} \cdot \frac{T_n}{T_n + T} \cdot \frac{p_n + p}{p_n} \quad (2.18)$$

ρ_n = Dichte des Gases bei Normalbedingungen
T_n = 273,15 K
T = [°C]
p_n = 1,013 bar
p = [bar]
ρ_1 = Dichte des Gases bei Betriebsbedingungen

Die Formel 2.16 lässt sich bei Gasen ($\rho_s << \rho_w$; $\rho_{s1} << \rho_1$) reduzieren auf:

$$(q_v)_n = q_{v1} \sqrt{\frac{\rho_s \cdot \rho_1}{\rho_{s1} \cdot \rho_n}} \quad (2.19)$$

Daraus ergibt sich mit der dimensionslosen Verhältniszahl ρ_s für den Luft-Tabellenwert:

$$(q_v)_{nLuft} = q_{v1} \sqrt{\frac{\rho_s \cdot \rho_B}{\rho_{s1}}} \tag{2.20}$$

oder für den Massedurchfluss qm:

$$(q_v)_{nLuft} = \frac{q_{m1}}{1,293} \cdot \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_{s1} \cdot \rho_B}} \tag{2.21}$$

Beispiel:

Messstoff	**Ammoniak, gasförmig**
Durchfluss q_m	1500 kg/l
Dichte ρ_n	0,7714 kg/m^3
Druck p	5 bar
Temperatur T	100 °C

nach Gleichung (2.18) und (2.19) gilt:

$$\rho_B = \frac{0,7714}{1,293} \cdot \frac{273}{373} \cdot \frac{6,013}{1,013} = 2,592$$

$$(q_v)_{nLuft} = \frac{1500}{1,293} \cdot \sqrt{\frac{8,02}{8,02 \cdot 2,592}} = 720,6\ m^3/h$$

Viskositätseinfluss

Nach der Dimensionierung und Auswahl des Durchflussmessers sollte der Viskositätseinfluss mit Hilfe der **Viskositäts-Unabhängigkeits-Zahl VUZ** geprüft werden.

$$\mathrm{VUZ} = \eta \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{(\rho_{s1} - \rho_1)\rho_1 \cdot \rho_w}} = \eta \sqrt{\frac{\rho_1 - 1}{(\rho_{s1} - \rho_1)\rho_1}} \qquad (2.22)$$

η = aktueller Viskositätswert des Messstoffes

Der errechnete VUZ-Wert muss kleiner sein als der in der Durchflusstabelle aufgeführte. Die Durchflussmesswerte sind bis zum berechneten Wert viskositätsunabhängig, auch bei Viskositätsschwankungen. Liegt der errechnete VUZ-Wert über der Tabellenangabe, muss das ausgewählte Gerät bei der aktuellen Viskosität kalibriert werden.

Beispiel:

Messstoff	**Ammoniak**
dynam. Viskosität η	0,23 m · Pas
Dichte ρ	0,68 kg/l
Schwebekörperdichte $\rho_s = \rho_{s1}$	8,02 (VA-Stahl)

$$\mathrm{VUZ} = 0,23 \sqrt{\frac{8,02 - 1}{8,02 - (0,68) \cdot 0,68}} = 0,27$$

Der mit **28** angegebene **VUZ -Tabellenwert** liegt weit über dem errechneten.
Es gibt keinen Einfluss der Viskosität.

Noch einfacher lassen sich Schwebekörper-Durchflussmesser mit dem ABB-Berechnungsprogramm „flow calc“ auswählen und exakt berechnen.

Gerätebeschreibung Kleindurchflussmesser

Kleindurchflussmesser sind konstruktiv klein gebaut und für kleine Durchflüsse zur örtlichen Anzeige ausgelegt. Alle sind so konstruiert, dass das Messrohr ausgetauscht werden kann, und alle haben ein Nadelventil, womit der Durchfluss eingestellt wird. Die Messspanne beträgt jeweils 1:10 bzw. 1:12,5 bei Skalenlängen zwischen 38 und 250 mm. Als Schwebekörper verwendet man die Kugel. Die Genauigkeit ist abhängig vom Messrohrwerkstoff und von der Skalenlänge.

Für Wasser oder äquivalent gerechnete andere Flüssigkeiten liegen die Messbereichsendwerte zwischen 0,03 l/h und 140 l/h, für Luft und Gase zwischen 2,88 und 4330 l/h.

Kleindurchflussmesser „SNAP-IN“ Serie FAG6100

"SNAP-IN", das ist eine elegante Methode für den Austausch des Messrohres. Die Messrohrhalterung und die Dichtelemente im oberen Fitting sind federnd gelagert, so dass das Messrohr nach oben gedrückt und nach unten herausgenommen werden kann. Eine Polykarbonatschutzkappe sichert das Messrohr. Das integrierte Rückschlagventil verhindert Rückströmungen. Ein Zertifikat vom DVGW liegt vor.



Bild 2-64: Serie FAG6100

Werkstoffe

Gehäuse:	Edelstahl
Messrohrhalter:	1.4401 Messing
Messrohr:	Borsilikatglas, Trogamid
Schwebekörper:	Glas, Saphir, Tantal
	1.4401, Carboloy
O-Ringe:	Buna-N, Viton-A, Ethylen-Propylen
Schutzkappe:	Polykarbonat

Technische Daten

Typ	Skalenlänge (mm)	Gehäuselänge (mm)	Messbereiche für Wasser
10A6134/44	38	120	3...48 cm^3/h bis 3...132 l/h
10A6131/41	70	151	24...264 cm^3/h bis 10...105 l/h
10A6132/42	130	264	2,6...32 cm^3/h bis 11,2...140 l/h

Der mit dem Nadelventil eingestellte Messwert wird bei Druckänderungen beeinflusst. Der zusätzlich angebaute Differenzdruckregler hält, unabhängig von Druckschwankungen, den Differenzdruck am Nadelventil und somit den eingestellten Durchfluss konstant.

Ringinitiatoren werden als Grenzsignalgeber eingesetzt.

Arbeitsweise

Bei Ringinitiatoren mit bistabilem Schaltverhalten zieht das Relais im Schaltverstärker bei Erreichen des Schaltpunktes durch die Schwebekörperkugel an. Das Relais bleibt auch dann angezogen, wenn sich der Schwebekörper weiter über dem Schaltpunkt bewegt. Das Relais fällt ab, sobald der Schwebekörper in entgegengesetzter Richtung den Schaltpunkt durchläuft und wieder in den Gutbereich gelangt. Der jeweilige Zustand, ober- oder unterhalb des Schaltpunktes, wird eindeutig angezeigt. Der Einsatz im Ex-gefährdeten Bereich ist möglich, da die verwendeten Ringinitiatoren als eigensichere Fühler mit eigensicherem Stromkreis arbeiten. Wegen der relativ geringen Messrohrlänge ist das Modell 10A6131/41 nur für einen min. oder max. Grenzwert zu empfehlen; für eine minimale und maximale Grenzwertsignalisierung ist das Modell 10A6132/42 besser geeignet.

Glaskonus-Durchflussmesser Serie FAG1190

Der am meisten verwendete Durchflussmesser ist dieses robust und einfach konstruierte Betriebsmessgerät. Flansche, Rohrinnengewinde oder auch das in der Nahrungsmittelindustrie bevorzugte Rundgewinde (DIN 11851) sind die Verbindungselemente zum Prozess. Glaskonus-Durchflussmesser sind für Durchflussmessungen in vielen Industriezweigen, wie z. B. Ofenbau, geeignet. Standardmäßig wird das Gerät mit Edelstahlgehäuse ausgeliefert.

Das Messrohr wird mit O-Ringen so gedichtet und gehalten, dass keine mechanischen Spannungen auftreten können.

Bei Gasmessungen schützt ein zusätzliches Schutzrohr aus Polycarbonat das Glasmessrohr vor Berührung und mechanischer Zerstörung. Damit ist der Personenschutz sichergestellt. Ein DVGW-Zertifikat liegt vor.

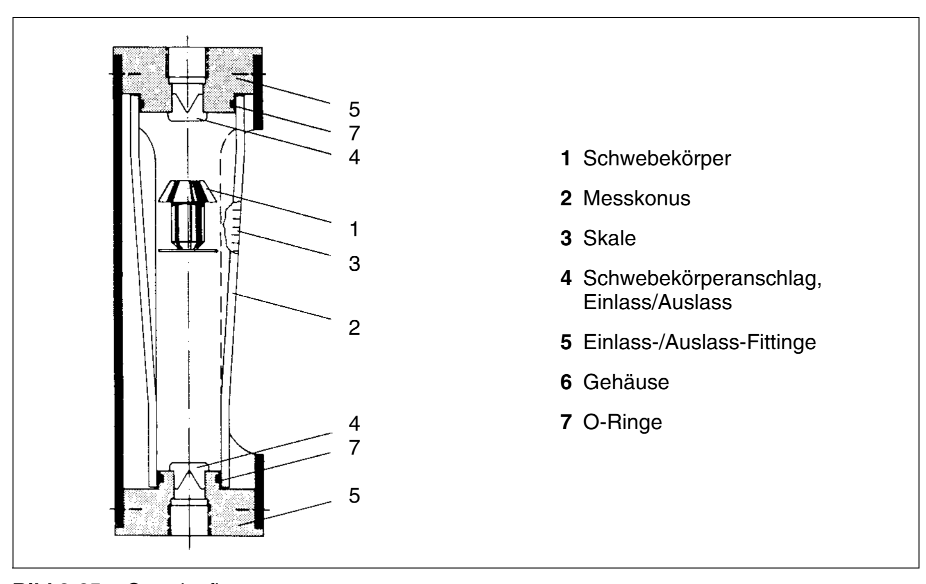


Bild 2-65: Grundaufbau

Werkstoffe:

Messrohr:	Borsilikatglas
Schwebekörper:	Glas, Saphir, Tantal, 1.4301, 1.4571, PVDF u. a.
Fittinge:	PVC, PVDF u. a.
O-Ringe:	Buna-N, Viton-A, Ethylen-Propylen
Gehäuse:	Edelstahl 1.4301
Anschlüsse	FAG1190-97: Innengewinde FAG1190-98: Flanschanschluss FAG1190-87: Rohrverschraubung



Bild 2-66: Serie FAG1190

Technische Daten:

Gehäuse-größe	Messrohr-größe	Skalen-länge	Messbereichsendwert (Wasser) [l/h]	Messbereichsendwert (Luft) [m³/h]	max. zul. Druck [bar]	Genauig-keits-klasse
1/4	1/16	100	0,03... 1,1	0,003... 0,04	38	6
1/4	1/18	130	0,37... 10	0,022... 0,33	33	1,6
1/4	1/4	130	4,7 ... 132	0,223... 4,03	30	1,6
1/2	1/2	250	43 ... 418	1,3 ... 12,3	21	1,6
3/4	3/4	250	144 ... 1300	4,3 ... 38,7	17	1,6
1	1	250	310 ... 2800	9,2 ... 83,0	14	1,6
1 1/2	1 1/2	250	560 ... 4800	17,3 ...142,5	9	1,6
1	1	250	1420 ...17000	42,6 ...510	7	1,6



Näherungsschalter schalten die Kontakte der Grenzsignalgeber für z. B. Min.- und Max.-Werte. Die verstellbaren Schutzgasschalter haben bistabiles Schaltverhalten, das heißt, der angeregte selbsthaltende Kontakt wird erst durch den zurückfallenden Schwebekörper geöffnet.

Bild 2-67: Grenzsignalgeber 55AX1000

Metallkonus-Schwebekörper-Durchflussmesser

Wesentlich universeller verwendbar als die Glaskonus-Schwebekörper-Durchflussmesser sind die in der Ganzmetallausführung. Die Druckbelastung kann bis 250 bar gehen, und die maximal zulässige Messstofftemperatur darf (abhängig von der Umgebungstemperatur) bis zu 400 °C betragen.

Die Übertragung der Schwebekörperstellung auf den Zeiger übernimmt ein Magnetfolgesystem mit einem Permanentmagneten im oder am Schwebekörper und Permanentfolgemagneten auf der Zeigerachse. Das Folgesystem reißt auch bei sprungförmigen Durchflussänderungen nicht ab. Die Führungsstange des Schwebekörpers bleibt auch bei extremen Ausschlägen innerhalb des Messohres.

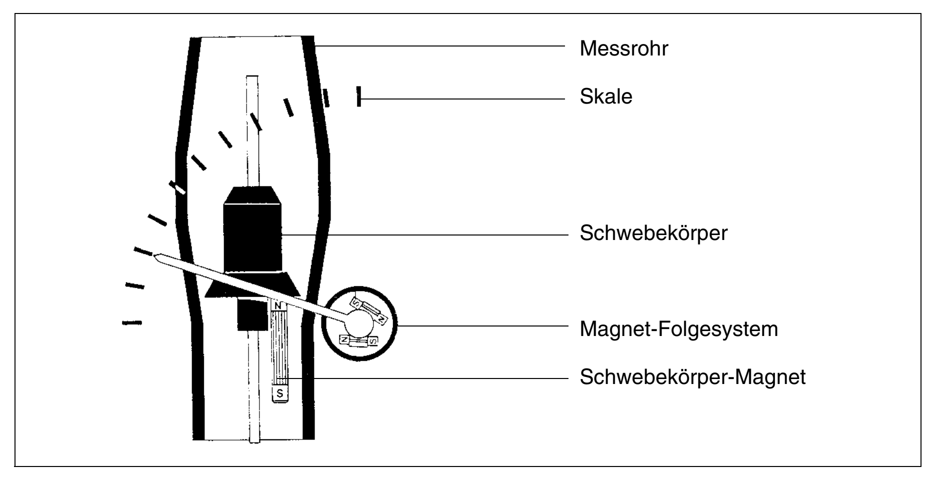


Bild 2-68: Grundaufbau eines Metallkonus-Schwebekörper-Durchflussmessers

Metallkonus-Durchflussmesser Serie FAM5400

Außer der standardmäßig vorhandenen örtlichen Durchflussanzeige stehen für diesen Durchflussanzeiger steckbare Einheiten zur Nachrüstung auf ein oder zwei Grenzsignalgeber, elektrische Messumformer mit Analogausgang 4...20 mA sowie ein zusätzliches Display zwecks Durchflusszählung und zusätzliche Digitalanzeige des momentanen Durchflusses zur Verfügung. Die Nachrüstung ist jeweils ohne Prozessunterbrechung möglich. Durch geeignete Werkstoffe der messstoffberührten Teile können chemisch aggressive (auch trübe) Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe gemessen werden. In Verbindung mit dem bewährten Multifunktionsschwebekörper eröffnet dieser Durchflussmesser neue Perspektiven in der traditionellen Durchflusstechnik.

Ein geeignetes Dämpfungssystem verhindert Kompressionsschwingungen bei Gas und Dampfmessungen. Mit Hilfe eines Doppelmantels lässt sich das Messrohr bei besonders schwierigen Fluiden mit Dampf oder Warmwasser beheizen.

Multifunktionsschwebekörper

Der Multifunktionsschwebekörper besteht aus einem Grundkörper, dessen geometrische Form durch Bestückung verschiedener Bauteile verändert werden kann. Außerdem kann das Gesamtgewicht des Schwebekörpers durch entsprechende Zusatzgewichte optimal angepasst werden.

Werkstoffe:

Messrohr:	1.4404 oder PTFE-Auskleidung
Schwebekörper:	1.4571, Hastelloy C, PTFE
Flansche:	1.4404
Anzeigergehäuse:	Aluminium

Messbereiche

Nennweite		Baulänge	Messbereichsendwerte	
			Wasser	Luft
DN	Inch	[mm]	[m^3/h]	[m^3/h]
15	1/2	250	0,03... 0,85	0,1... 25
25	1	250	0,28... 6,1	8,4... 180
50	2	250	4,2 ... 24	125 ... 720
80	3	250	7 ... 54	210 ...1550
100	4	250	25 ...120	760 ...3600

Technische Daten

Skalenlänge:	100 mm
max. möglicher Druck:	450 bar
max. mögl. Temperatur:	400 °C (bei Umgebungstemperatur 50 °C)
Genauigkeitsklasse:	1,6
Kontaktausgang:	1 oder 2 Grenzkontakte über Schlitzinitiator
Analogausgang:	4...20 mA; Speisespannung 14...28 V DC eigensichere Speisung II 2G EEx ib IIC T4 nicht eigensichere Speisung II 2G EEx d IIC T6
Kommunikation:	HART-Protokoll

Elektrischer Messumformer

Alle Metallkonus-Durchflussmesser mit Messumformer sind so gestaltet, dass die mechanische Anzeige auch dann sichergestellt ist, wenn der Messumformer ausfällt. Das bedeutet, dass der Messwert am Messort jederzeit abgelesen werden kann, auch wenn die Übertragung des elektrischen Signals gestört ist.

Bei dem Messumformer auf µP-Basis handelt es sich um eine 2-Leiter-Ausführung. Für die Hilfsenergieversorgung und für den Stromausgang 4-20 mA mit HART-Protokoll wird nur ein 2-adriges Kabel benötigt. Dieser intelligente SMART-Messumformer ermöglicht den Aufruf aller Messparameter, die bei Bedarf neu eingestellt werden können.

Der Messumformer überwacht sich selbst und hat eine automatische Fehlerdiagnose. Die Bedienung bei offenem Gehäuse ist über drei zugängliche Schalter möglich. Bei geschlossenem Gehäuse (Ex-Ausführung) erfolgt die Bedienung von außen mit Hilfe eines Magnetstiftes. Zur Digitalanzeige dient ein kontrastreiches zweizeiliges Display.



FAM5400 mit 4...20 mA-Strom-
ausgang und Display

FAM5400
mit Grenzkontakt

Bild 2-69: Ganzmetall-Durchflussmesser Serie FAM5400

Ganzmetall-Kleindurchflussmesser Serie FAG3200

Mit dem kleinen Schwebekörper-Durchflussmesser in Ganzmetallbauweise ist es problemlos möglich, unter extremen Bedingungen den Durchfluss von Gasen und Flüssigkeiten zu messen. Trübe Flüssigkeiten, die besonders in der chemischen-, petrochemischen- und pharmazeutischen Industrie Verwendung finden, sind für diesen Durchflussmesser kein Problem.

Aber auch im Laborbereich, in Gasanalyseanlagen und überall dort, wo die vorherrschenden Bedingungen die Verwendung von Glas-Messrohren ausschließt, zeigen sich die Vorteile des kleinen Ganzmetall-Durchflussmessers.

Werkstoffe:

Messstoffberührte Teile:	1.4571, PVDF
O-Ringe:	Viton-A, Buna-N
Anzeigergehäuse:	Alumunium, Edelstahl
Kappe:	Polykarbonat, Trogamid, Edelstahl mit Glasfenster

Technische Daten:

kleinster Messbereich:	0,1...1,0 l/h Wasser
	0,008...0,048 m^3/h Luft
größter Messbereich:	300...3000 l/h Wasser
	8...90 m^3/h Luft
Skalenlänge:	60mm
max. zul. Druck:	100 bar
max. zul. Temperatur:	150 °C
Genauigkeitsklasse:	6
Analogausgang:	4...20 mA
Kontaktausgang:	1 oder 2 Grenzkontakte über Schlitzinitiatoren

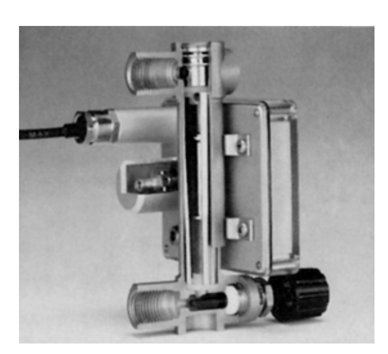


Bild 2-70: Schnittbild Ganzmetall-Kleindurchflussmesser



Bild 2-71: Ganzmetall-Kleindurchflussmesser

2.2.3 Magnetisch-induktive Durchflussmesser

Bewegt man einen elektrischer Leiter in einem Magnetfeld, so wird senkrecht zur Bewegungsrichtung und senkrecht zum Magnetfeld eine elektrische Spannung induziert, deren Größe der Magnetfeldstärke und der Geschwindigkeit der Bewegung proportional ist. Diese Aussage des Induktionsgesetzes lässt sich auch auf ein mit einer leitenden Flüssigkeit gefülltes Rohr beziehen, wenn die Flüssigkeit im Magnetfeld fließt.

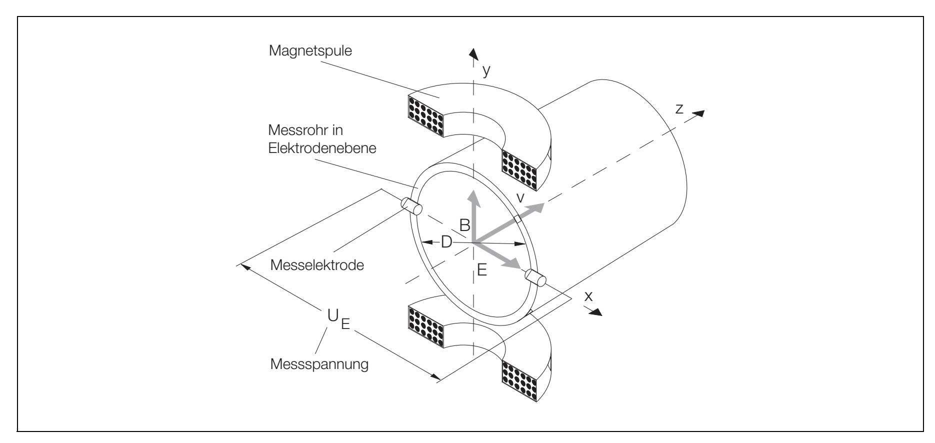


Bild 2-72: Prinzip des magnetisch-induktiven Durchflussmessers

Für den so entstandenen magnetisch-induktiven Durchflussmesser IDM ergibt sich folgende Beziehung:

$$U \sim B \cdot v \cdot D \tag{2.23}$$

mit der Induktion B, der Fließgeschwindigkeit v und der Leiterlänge (Rohrdurchmesser) D.

Der Durchfluss q_v durch den betrachteten Rohrquerschnitt A ist

$$q_v = A \cdot v = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot v \tag{2.24}$$

Die Vereinigung beider Gleichungen liefert die entscheidende Beziehung für dieses Messsystem:

$$U \sim q_v$$

Eine Realisierung des in Bild 2-72 gezeigten Prinzips setzt voraus, dass sich im Rohrinneren ein Magnetfeld aufbaut und dass die induzierte Spannung störungsfrei abgegriffen wird. Zwei Erregerspulen erzeugen das Magnetfeld, das im Rohr nur dann entsteht, wenn es nicht durch einen magnetisierbaren Rohrwerkstoff abgeleitet wird. Austenitischer Stahl hindert das **Magnetfeld** nicht; deshalb ist dies der meist verwendete Rohrwerkstoff im IDM. Zur Vermeidung einer Spannungsableitung für das Messsignal U bekommt das Rohr eine isolierende Innenauskleidung. Der Abgriff des Messsignals U erfolgt mit Hilfe zweier metallischer Elektroden, die mit dem Messstoff im galvanischen Kontakt stehen.

Eine weitere Voraussetzung für die Funktion ist bereits erwähnt, nämlich die Tatsache, dass die Flüssigkeit einen elektrischen Leiter darstellt. Deshalb wird eine Mindestleitfähigkeit gefordert, die je nach Gerätetyp 20; 5; 0,05 μS/cm betragen soll.

Struktur des Magnetfeldes

Die an den Elektroden abgegriffene Spannung U ist die Summe aller Elementarspannungen aus dem gesamten magnetisch erregten Raum im Messrohr. Die folgende Betrachtung vernachlässigt den räumlichen Aufbau des Magnetfeldes, sie beschränkt sich auf den ebenen Rohrquerschnitt im Bereich des Elektroden. Dabei stellt sich heraus, dass der Durchgriff der Elementarspannung zu den Elektroden oder anders gesagt, die Intensität, mit der die Teilspannungen an der Gesamtspannung U beteiligt sind, von der geometrischen Lage der Teilspannungen abhängig ist.

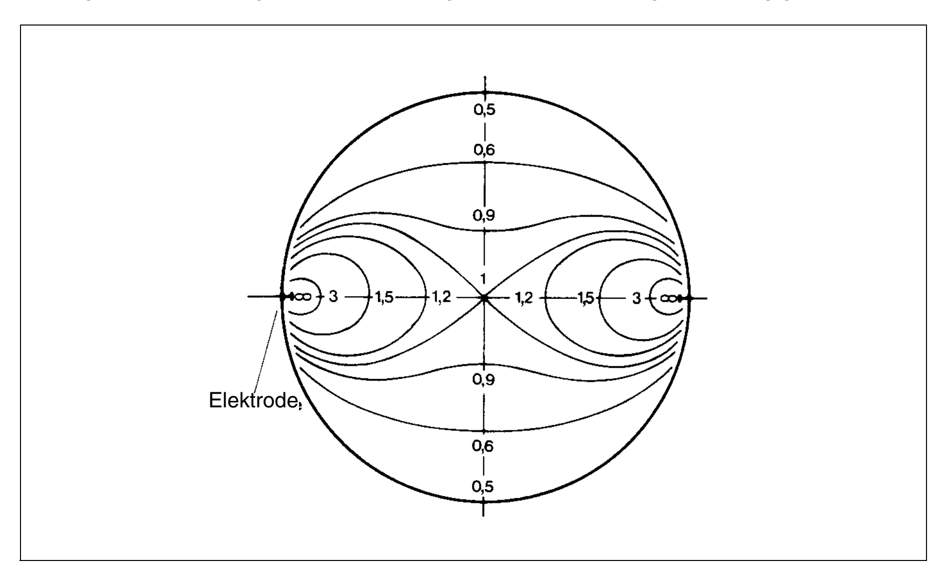


Bild 2-73: Wertigkeitsverteilung in der Elektrodenebene

Im Bild 2-73 ist die Intensitätsverteilung bezogen auf den willkürlich gewählten Wert „1“ im Zentrum dargestellt. Es ist sicher verständlich, dass die in Elektrodennähe entstandene Elementarspannung stärker wirksam wird als die am Pol induzierte. Mit dem Begriff **Wertigkeit W** bezeichnet man den Faktor des lageabhängigen Durchgriffs. In einem homogen aufgebauten Magnetfeld, bei dem also die Induktion B an allen Orten gleich groß ist, sind auch die Elementarspannungen, gemessen am Entstehungsort, überall gleich groß. Vorausgesetzt,die Fließgeschwindigkeit des Messstoffes ist ebenfalls überall gleich groß.

Bei einem unsymmetrischen Strömungsprofil, beispielsweise nach einem Rohrkrümmer (Bild 1-7a), werden die verschiedenen Bereiche im Rohrquerschnitt unterschiedlich beaufschlagt. Es kommt zur Überbewertung einiger Bereiche und zur Unterbewertung anderer mit dem Ergebnis, dass die Gesamtspannung U nicht mehr dem Mittelwert aller Teilspannungen entspricht, also auch nicht mehr den Durchfluss repräsentiert.

Mit dem wertigkeitsinversen Aufbau des Magnetfeldes wurde eine Methode des Ausgleichs gefunden. Das Magnetfeld wird im Bereich kleiner Wertigkeit verstärkt und umgekehrt, bei großer Wertigkeit geschwächt, so dass schließlich das Produkt aus Wertigkeit W und Induktion B über den gesamten Querschnitt betrachtet konstant ist:

$$W \cdot B = \text{const} \tag{2.25}$$

Jetzt ist der Durchgriff aller Teilspannungen gleich groß, das unsymmetrische Strömungsprofil verursacht keine Fehler.

Die praktische Realisierung eines wertigkeitsinversen Magnetfeldes ist mit vertretbaren Mitteln nur annähernd möglich. Diese Tatsache ist der Grund dafür, dass eine kurze Rohrberuhigungstrecke von 3 bis 5 mal Rohrdurchmesser vor dem magnetisch-induktiven Durchflussmesser empfohlen wird. Auf dieser Strecke kommt es auch nach Strömungsstörern zu der erforderlichen Egalisierung.

Störspannungen

Die Messspannung U ist kleiner als 0,5 mV pro 1 m/s Fließgeschwindigkeit. Sie ist überlagert mit Störspannungen, deren Größe z. T. erheblich darüberliegt. Dem nachgeschalteten Messumformer kommt die Aufgabe zu, den Einfluss der Störer zu beseitigen und das Messsignal so zu verstärken und umzuwandeln, dass nachgeschaltete Geräte wie Anzeiger, Schreiber, Regler betrieben werden können.

Welche Störspannungen treten auf?

Da ist zuerst eine elektrochemische Gleichspannung. Sie entsteht in einem galvanischen Element an den Grenzflächen der Elektroden beim Übergang von der ionenleitenden Flüssigkeit zum elektronenleitenden metallischen Leiter. Diese „Polarisa-

tionsspannungen“ sind von unterschiedlichen Umgebungseinflüssen – wie z. B. Temperatur, Druck, Messstoffzusammensetzung – abhängig. Sie sind in ihrer Größe nicht reproduzierbar und unterschiedlich an den beiden Elektroden, so dass ihr Einfluss nicht vorhergesagt werden kann.

Die Erregerspulen sind kapazitiv mit der Signalleitung im Inneren des magnetisch-induktiven Durchflussaufnehmers und mit den Elektroden verkoppelt. Die eingekoppelte „kapazitive Störspannung“ ist von der Erregerspannung abhängig und vom Innenwiderstand der Messstrecke, somit von der Leitfähigkeit des Messstoffes. Sorgfältige Abschirmungsmaßnahmen, besonders bei niedriger Leitfähigkeit, sollen Streukapazitäten vermeiden.

Die Signalleitung im Gerät, das sind die Verbindungsleitungen von den Elektroden kommend, werden über dem Rohr zusammengeführt und bilden zusammen mit der Messstrecke eine Leiterschleife im Transformator, in die der Erregerkreis eine „transformatorische Störspannung“ induziert.

Präziser mechanischer Aufbau und saubere Leitungsführung minimieren diese Störspannung. Flüssigkeitsgefüllte Rohrleitungen, vor allem die großer Nennweite, sind gute Leitungswege für Erdungsströme aus Unsymmetrien im elektrischen Leitungsnetz.

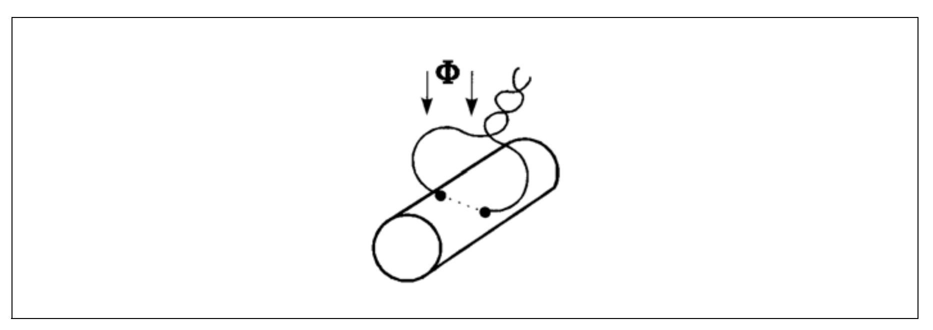


Bild 2-74: Leiterschleife im Transformator

Der dann zwischen den Elektroden entstehende Spannungsabfall ruft eine weitere „äußere” Störspannung hervor, die man dadurch verhindert, dass man den Erdungsstrom um das Messsystem herumleitet, und zwar durch parallel schalten eines niederohmigen Leitungsweges (starker Kupferdraht) mit Erdung.

Zur Verhinderung der Störeinflüsse gibt es, je nach Art der Magnetfelderregung, unterschiedliche Maßnahmen, die die Entstehung oder den Einfluss verhindern. So werden Gleichspannungen, wie z. B. die Polarisationsspannungen, durch kapazitive Ankopplung des nachgeschalteten Messumformers gesperrt.

Die Magnetfeld-Erregung

Der geometrische Aufbau des Magnetfeldes wurde bereits beschrieben. Wie sieht nun der zeitliche Ablauf bei Berücksichtigung der Störeinflüsse aus?

Am einfachsten wäre sicher die Felderregung mittels Permanentmagneten. Alle durch Wechselspannung verursachten Störspannungen wären dann wirkungslos. Leider wäre aber der Einfluss der Polarisationsspannungen, deren Größe ja nicht vorhersehbar sind, so stark, dass sie das gesuchte Messsignal unterdrücken würden. Ist dann die Erregung mit 50 Hz-Wechselspannung die Alternative? Dieses System hat mit den Störspannungen aus dem Wechselfeld zu kämpfen, hat aber durchaus seine Existenzberechtigung.

Ein Verfahren der Magnetfelderregung, das die Vorteile der beiden genannten Systeme nutzt und deren Nachteile verhindert, ist das geschaltete Gleichfeld.

Das geschaltete Gleichfeld

Im Zeitpunkt t_0 liegt eine Gleichspannung an den Erregerspulen. Wegen der Induktivität der Spulen wächst der Erregerstrom **I** langsam auf seinen Endwert.

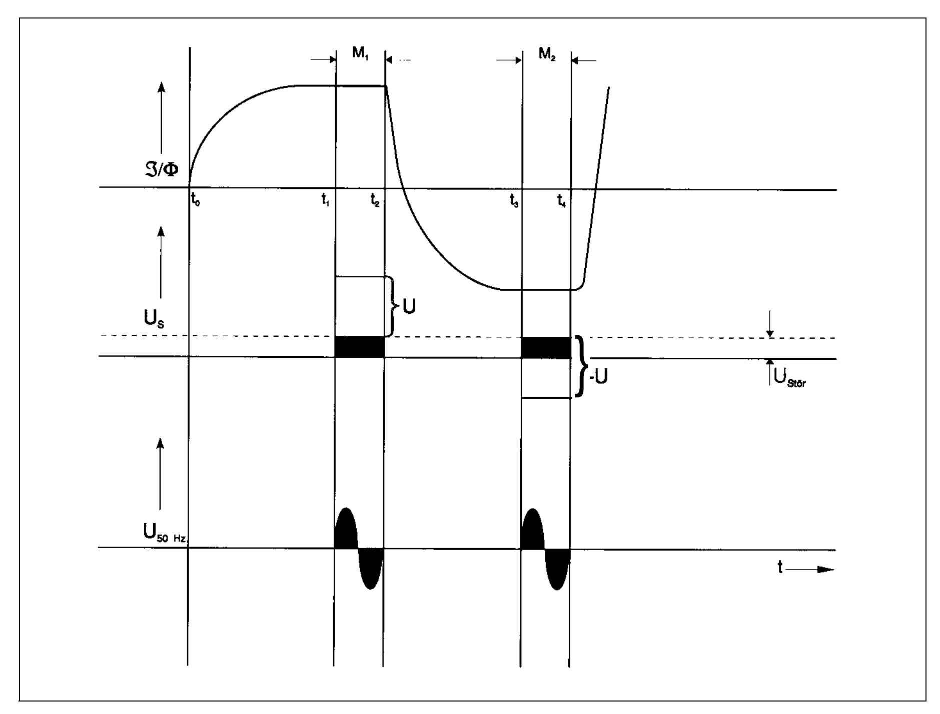


Bild 2-75: Magnetfeldversorgung mit geschaltetem Gleichfeld

Nach dem Abklingen des transienten Übergangs bleiben Erregerstrom I und magnetischer Fluss konstant, der Differentialquotient ist null:

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0$$

Damit verschwinden die transformatorischen und zum größeren Teil auch die kapazitiven Störspannungen.

Erst wenn dieser Zustand nach 60 ms sicher erreicht ist, schaltet sich im Zeitpunkt t_1 der Messumformer ein und erfasst während eines Zeitraums von 20 ms das Elektrodensignal $U_s \cdot 20$ ms ist die Zeit für eine Periode des 50 Hz-Systems (bei anderen Frequenzen entsprechende Zeiten). 50-Hz-Störer, das sind vor allem die äußeren Störspannungen, elimieren sich selbsttätig.

Die Elektrodenspannung U_s beinhaltet die gesuchte Messspannung U und den nicht kompensierten Störrest $U_{stör}$. Während der Messzeit M_1 gilt:

$$U_{s1} = U + U_{stör} \qquad (2.26a)$$

Dieser Wert wird gespeichert.

Bei t_2 wird die Gleichspannung umgepolt, der Erregerstrom und die durch ihn verursachte Messspannung U haben die umgekehrte Richtung. $U_{stör}$ bleibt unbeeinflusst, so dass während der Messzeit M_2 folgende Beziehung gilt:

$$U_{s2} = -U + U_{stör} \qquad (2.26b)$$

Der Messumformer subtrahiert die Werte aus beiden Messzeiten.

$$U + U_{stör} - (-U + U_{stör}) = 2U \qquad (2.26c)$$

Das Ergebnis ist die dem Volumendurchfluss proportionale Signalspannung U; sie ist frei von Störspannungen. Man spricht auch vom System mit automatischem Nullpunkt, denn dieser wird ja bei einer Erregerfrequenz von 6 1/4 Hz sechseinviertel Mal je Sekunde verrechnet.

Mit dem stabilen Nullpunkt erreicht man eine bessere Genauigkeit, und das bei einer unteren Leitfähigkeitsgrenze für den Messstoff von 5 μS/cm.

Die Wechselfelderregung

Das System des geschalteten Gleichfeldes hat seine Grenze dort, wo der Messeffekt so kurzzeitig benötigt wird, dass der Messzyklus von 160 ms zu lang ist.

Ein Beispiel dafür ist die Fülltechnik, bei der extrem kurze Messzeiten mit exaktem Ventilschließverhalten gekoppelt sind. Ein weiterer Einsatzfall sind Zweiphasenmessstoffe , also hydraulischer Feststofftransport von z. B. Papierstoff oder Baggergut. Dieses Messgut verursacht bei Gleichstromerregung eine Rauschspannung, die sich dem Messsignal überlagert und Fehler verursacht. Der Rauscheffekt tritt bei Wechselfelderregung nicht auf.

Die Netzwechselspannung (z. B. 50/60 Hz) wird direkt oder über eine Treiberstufe im Messumformer zur Feldversorgung aufgeschaltet. Wegen der großen Induktivität der Magnetspulen eilen Erregerstrom I und magnetischer Fluss Φ phasenverschoben um nahezu 90° nach.

Die Signalspannung U liegt mit Φ in Phase, sie ist also eine netzfrequente sinusförmige Wechselspannung, deren Amplitude dem Durchfluss proportional ist. Die unterschiedlichen Störspannungen laufen zusammen mit den Signalspannungen in den nachgeschalteten Messumformer, der selektieren muss.

Die Gleichspannungsstörer (Polarisationsspannung) werden kapazitiv ausgekoppelt. Die Wechselspannungsstörer (transformatische und kapazitive Störspannungen) liegen mit dem Signal U nicht in Phase; sie werden als gerätebezogene Größen phasenselektiv getrennt und automatisch kompensiert.

Die äußeren Störwechselspannungen lassen sich leider in ihrer Phasenlage und ihrer Größe nicht vorherbestimmen. Alle Anteile, die mit der Signalspannung U nicht in Phase liegen, fallen der automatischen Kompensation zum Opfer. Lediglich der In-Phase-Anteil beeinflusst das Messsignal in der Weise, dass er den Systemnullpunkt unstabil macht. Diesen Störanteil beseitigt man dadurch, dass man die bei ruhendem Durchfluss auftretenden Messwerte statisch kompensiert.

Die Nullpunkteinstellung lässt sich dann automatisieren, wenn sich während der Messung ein definierter Durchfluss-Stillstand einstellt. Das ist beispielsweise bei Abfüllvorgängen der Fall. Wenn hier das geschlossene Absperrventil „Stillstand“ signalisiert, bekommt der Messumformer den Befehl zur Nullpunktkorrektur. Die Wechselfelderregung gestattet eine Mindestleitfähigkeit von 20 µS/cm. Die Leitfähigkeitsgrenze lässt sich durch einen Impedanzwandler auf 0,5 µS/cm absenken. Die Weiterentwicklung dieser Technik erzeugt in der Treiberstufe eine Wechselfelderregung mit einer Frequenz die deutlich über der normalen Netzfrequenz von 50/60 Hz liegt. Dadurch können nun die Netzfrequenzstörer automatisch eliminiert werden und die Geräte erhalten damit eine Nullpunktstabilität die fast genau so gut ist, wie die der Gleichfeldtechnik.

Signalabgriff

Bei der bisherigen Betrachtung wurde vorausgesetzt, dass die Elektroden mit dem Messstoff galvanisch in Verbindung stehen. Das ist der Normalfall. Es gibt aber Einsatzfälle, bei denen dieses System versagt, beispielsweise bei extrem niedriger Leitfähigkeit oder bei isolierenden Belägen. Die Isolation auf der Elektrode unterbricht den Signalstromkreis.

Die Oberfläche der Normalelektrode und die der Rohrauskleidung bilden eine glatte Fläche. Mit einer spitz ausgeformten Elektrode, die in die Zonen höherer Geschwindigkeit hineinragt, erzielt man einen Selbstreinigungseffekt für leicht ablösbare Beläge. In schwierigen Fällen, z. B. bei dicken Fettschichten, hilft die mechanische Reinigung über einen Blindflansch in der Rohrleitung oder nach einer Demontage.

Dieser relativ große Aufwand sichert selten eine Langzeitwirkung. Diese erreicht man nur mit dem **kapazitiven Signalabgriff** (Bild 2-76).

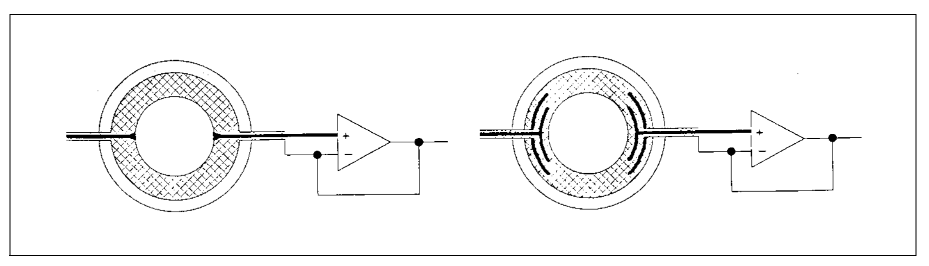


Bild 2-76: Signalabgriff, links galvanisch, rechts kapazitiv

Zwei metallene Flächenelektroden befinden sich in oder hinter der Rohrauskleidung. Sie bilden mit den die Innenwand benetzenden Flüssigkeitsschichten zwei Kondensatoren, deren Dielektrikum die Auskleidung ist.

Die Signalbildung geschieht wie bereits beschrieben mit dem geschalteten Gleichfeld oder mit Wechselfelderregung. Die erzeugte Spannung lädt die Kondensatoren, so dass außen ein proportionaler Messwert abgegriffen werden kann. Da die Kapazität mindestens 20 pF haben muss, sind die räumlichen Abmaße nach unten begrenzt, das bedeutet, dass das kleinstmögliche Gerät nicht unter DN 25 liegen kann.

Schirmelektroden zwischen Messelektrode und Rohr verhindern den kapazitiven Durchgriff nach außen. Das Driven-Shield-Verfahren verhindert die Wirksamkeit von Kapazitäten in der Signalleitung und am Schirm. Dabei wird das Potential des Signalleiters auf dem Schirm zurückgekoppelt, so dass kein Spannungsgefälle zwischen Leiter und Schirm entsteht.

Die kleinstmögliche **Leitfähigkeit** beim kapazitiven Signalabgriff beträgt 0,05 µS/cm.

Aufnehmer

Der magnetisch-induktive Durchflussmesser besteht aus dem Aufnehmer und dem Messumformer. Bestimmend für die Auswahl der Aufnehmer ist die Werkstofffrage und der Rohrleitungsanschluss. Im Inneren des Messrohres berühren die Rohrauskleidung und die Elektroden den Messstoff. Sie müssen also aus Werkstoffen gefertigt sein, die gegenüber den unter Umständen sehr aggressiven Messstoffen chemisch resistent sind. Die am häufigsten verwendeten Auskleidungswerkstoffe sind Hartgummi, Weichgummi, PTFE, PFA, Keramik, die der Elektroden sind Stahl 1.4571, 1.4539, Hastelloy, Tantal, Platin.

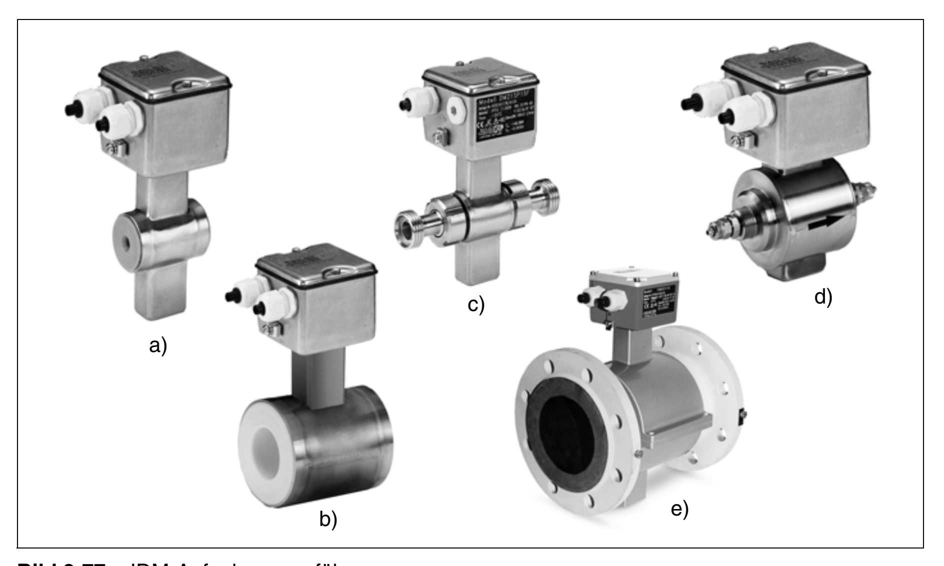


Bild 2-77: IDM-Aufnehmerausführungen

a) Aufnehmer, Zwischenflansch
b) Aufnehmer, Zwischenflansch
c) Aufnehmer, Rohrverschraubung DIN 11851
d) Aufnehmer, Sanitäranschluss
e) Aufnehmer mit Flansch als Prozessanschluss

Das Äußere des Aufnehmers bilden Gehäuse, Messrohr und Rohranschlüsse. Auch hier bestimmt der Einsatzfall, d. h. die Umgebungsbedingungen, die Werkstoffe. Das Messrohr ist physikalisch festgelegt auf austenitischen, also nicht rostenden, Stahl. Die Rohranschlüsse sind in der Regel aus Stahl oder Edelstahl, während das Gehäuse entweder aus lackiertem Aluminiumguss oder Edelstahl besteht.

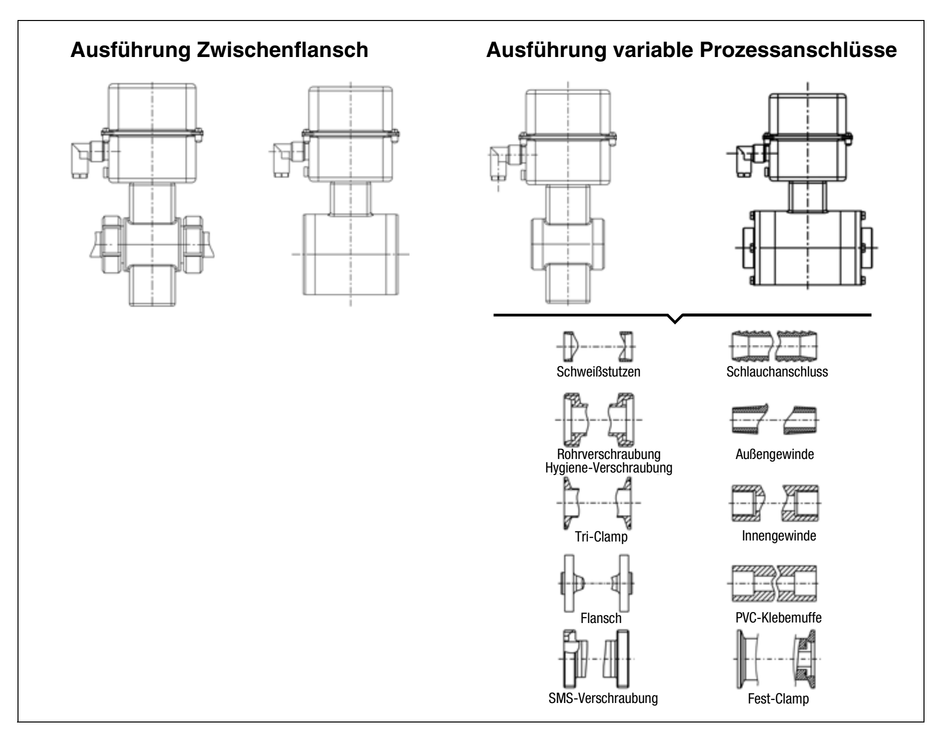


Bild 2-78: IDM-Aufnehmer in Edelstahl mit vakuumfester PFA-Auskleidung und variablem Prozessanschluss

Magnetfeldstabilisierung

Nach Gleichung (2.23) ist die Signalspannung U_0 den drei Größen Induktion B, Durchmesser D und Fließgeschwindigkeit v proportional. Eine direkte Abhängigkeit von einer Größe setzt die Konstanz der anderen voraus. Wenn also die Spannung U_0 ausschließlich von der Geschwindigkeit v bestimmt werden soll, müssen Induktion B und Durchmesser D unveränderliche Größen sein. Während D als mechanische Größe stabil ist, ändert sich die Induktion B mit dem Erregerstrom I, und dieser wird durch Überwachung einer im Aufnehmer/Messumformer erzeugten Spannung U_{Ref} konstant gehalten.

Magnetisch-induktive Durchflussmesser werden grundsätzlich bei Durchfluss kalibriert, und zwar bei Umgebungstemperaturen von ca. 20 °C. Wenn das Gerät später bei anderen Temperaturen betrieben wird, verändert sich der ohmsche Anteil des Spulenwiderstandes, mit ihm der Erregerstrom I und die Induktion B, somit auch die Signalspannung U_0.

Die Erregerspannung ist netzabhängig, kann schwanken und übt dann ebenfalls Einfluss auf den Strom aus.

Die Einflüsse lassen sich durch Strom-Konstanthalter verhindern, eine aufwendige Methode. Ein elegantes Verfahren ist die Kompensationsschaltung.

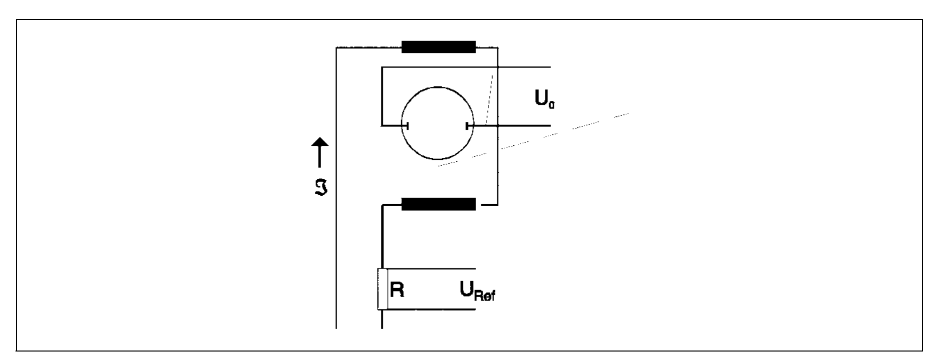


Bild 2-79: Erzeugung der Kompensationsspannung

An einem Widerstand R im Erregerstromkreis entsteht ein Spannungsabfall U_{Ref}, der dem Strom I und damit der Induktion B proportional ist. Auch U_0 ist der Induktion B proportional. Wenn man die beiden Größen ins Verhältnis setzt U/U_{Ref}, so entfällt der Einfluss der Induktion B. Aus Grundgleichung (2.23) und (2.24) ergibt sich

$$q_v = \frac{A}{D} \cdot \frac{U_0}{B} \tag{2.27}$$

ersetzt man B durch U_{Ref}, so lässt sich ausdrücken

$$q_v = K \cdot \frac{U_0}{U_{Ref}} \tag{2.28}$$

Die Gleichung mit K als **Kalibrierfaktor** ist die Basis für die Kalibrierung der magnetisch-induktiven Durchflussmesser von **ABB**. Der Kalibrierfaktor K wird bei Geräten mit geschalteter Gleichfelderregung durch Kalibriergröße C_Z (Nullpunkt) und C_S (Spannewert) nach Erregerfrequenz in ein Speichermodul (EEPROM/FRAM) eingelesen und weitere Parameter z. B. Nennweite, Messbereich, Impulswertigkeit, Wahl der Ein- und Ausgänge abgespeichert.

Der eingesetzte Messumformer arbeitet ständig mit diesen Daten und kontrolliert somit auch den Erregerstrom und die Referenzspannung. So befindet sich mit der ständigen Überwachung der Daten auch der Erregerstromkreis unter Kontrolle. Da die Kalibrierwerte und Einstellparameter in digitaler Form im EEPROM/FRAM abgesichert werden, ist damit auch ein Austausch des Messumformers an jeden beliebigen Aufnehmer möglich. Die einheitliche Messumformer-Elektronik ist universell für alle Nennweitenbereiche einsetzbar.

Messumformer

Die Aufgabe des Messumformers ist es, die relativ kleine Signalspannung zu verstärken, von Störspannungen zu befreien, sie in eine verarbeitbare Größe umzuwandeln und den Wert direkt anzuzeigen.

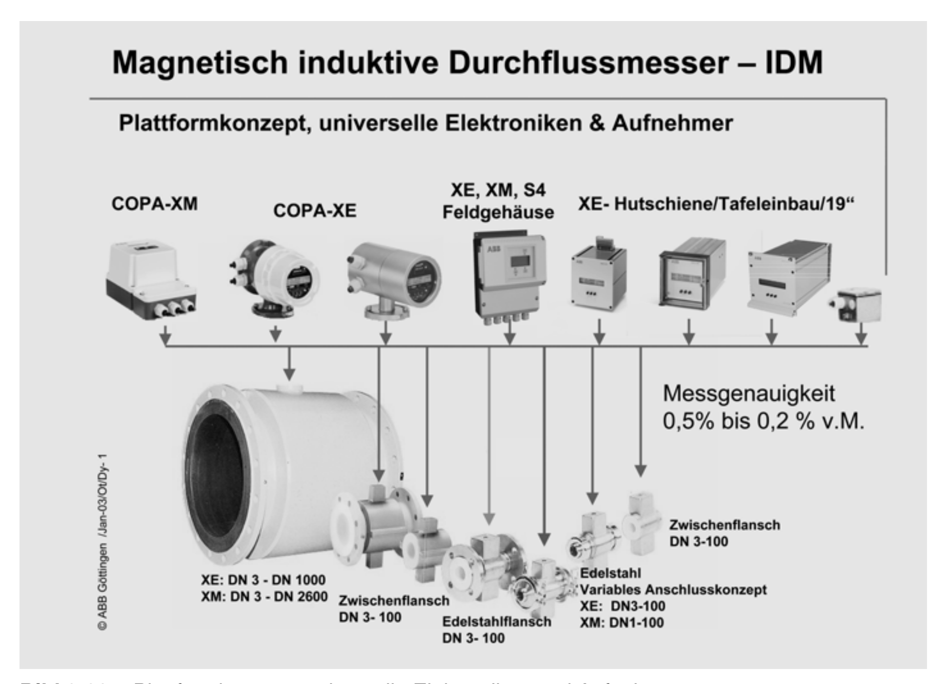


Bild 2-80: Plattformkonzept, universelle Elektroniken und Aufnehmer

Unterschiedliche Ausführungen der Messumformer bewirken in Kombination mit dem Aufnehmer die jeweilige Qualifikation des IDM-Systems.

Messumformer XE

Der Messumformer XE ist ein mikroprozessor-gesteuerter Messumformer mit örtlicher Durchfluss-Anzeige und -Zählung. Die Bedienung kann bei geschlossenem Messumformergehäuse berührungslos mit einem Magnetstift oder bei geöffnetem Gehäuse über drei Tasten erfolgen. Die örtliche Displayanzeige ist für eine einwandfreie Ablesbarkeit in allen Einbaulagen in drei Positionen steckbar. Alle Messstellenparameter werden automatisch überwacht und Fehler gemeldet. Das Gerät verfügt standardmäßig über einen konfigurierbaren Stromausgang (0...5; 0/2...10; 0/4...20mA) und Impulsausgang (Optokoppler, passiv oder aktiv), Schalteingänge und -ausgänge und Leerrohrerkennung. Das System XE hat die Fehlergrenze ± 0,5 % vom Messwert. Die Kommunikation über HART-Protokoll, PROFIBUS DP, PROFIBUS PA, FOUNDATION Fieldbus ist optional möglich.

Messumformer XM

Bei dem Messumformer XM handelt es sich um ein überwachungsgesichertes und bedienfreundliches Gerät mit örtlicher Durchfluss-Anzeige und -Zählung. Außer den drei Tasten sind keine weiteren Bedienelemente nötig. Alle Messstellenparameter werden automatisch überwacht und Fehler gemeldet. Außerdem gestattet die Tastatur den Aufruf aller Parameter und die Einstellung der veränderbaren. Die Kommunikation ist über HART-Protokoll oder PROFIBUS DP möglich.



Bild 2-81: Messumformereinschub XM mit Tastatur und Display

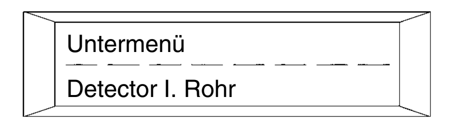
Das hinterleuchtete Anzeigedisplay (LCD) erlaubt wegen der Punktmatrix eine große Auflösung der Schrift, so dass alle Aussagen und Bezeichnungen ungekürzt lesbar erscheinen und das in neun Landessprachen wählbar.

Anzeige	Erläuterung
→V 98.14 % ←R 516.000 m³	oben: →V = Vorlauf, Durchflussanzeige hier in % unten: ←R = gezähltes Volumen im Rücklauf
Prog.Schutz aus	Programmierschutz verhindert unbefugte Bedienung. Durch eine vierstellige Codezahl Zugang für Fachpersonal möglich.
Schleichmenge 1.0000 %	Schleichmengeneinstellung vermeidet die ungenaue Zählung z. B. unter 1 % vom Messbereichsendwert, verhindert Zählung bei hydraulischen Rohrschwankungen bei Stillstand.

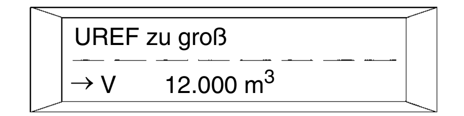
Bild 2-82: Anzeigebeispiele



Die Dichte-Vorgabe ermöglicht die Darstellung des Massedurchflusses und Zählung.



Wenn das Messrohr leerläuft, wird die Messung unterbrochen und der Alarmkontakt geschaltet.



Fehlermeldung zur Referenzspannung U_{Ref}. Magnetfelderregerstrom ist zu groß. Fehlermeldung über Kontaktausgang und Speicherung aller auftretenden Störungen im Fehlerspeicher.

Die wenigen Beispiele (Bild 2-82) zeigen die Vielfalt der Abfrage- und Einstellmöglichkeiten. Selbstverständlich geschieht die Bedienung im Betriebszustand, d. h. dass die Messwerte während der Parametrierung weiter verarbeitet werden. Bei Spannungsausfall werden alle Daten bis zu 10 Jahren gespeichert. Die Fehlergrenze des XM-Systems beträgt ± 0,4 % und optional ± 0,2 % vom Messwert.

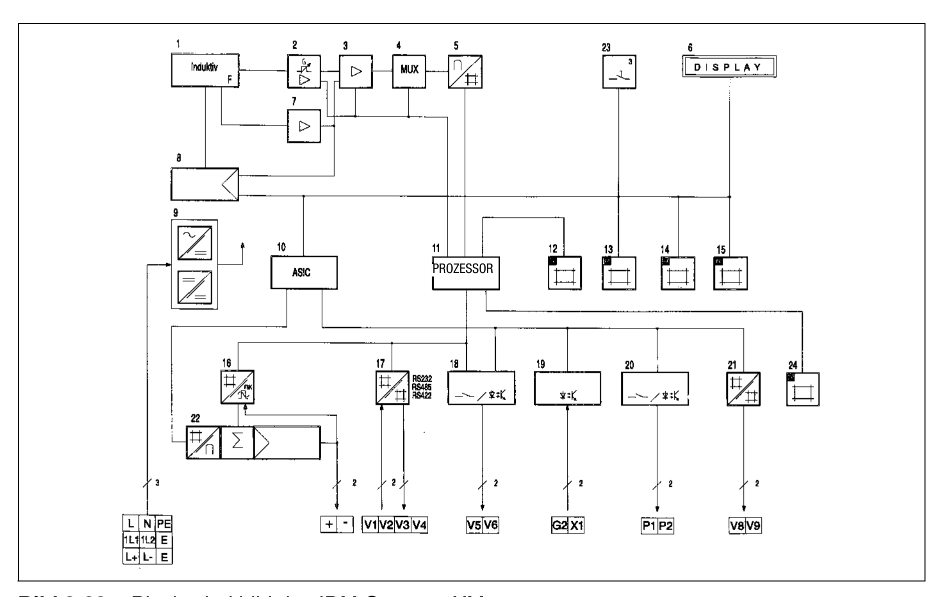


Bild 2-83: Blockschaltbild des IDM-Systems XM

Messumformer FSM4000

Dieser Messumformer gehört zu den wechselfelderregten IDM-Systemen mit neuer erhöhter Treiberstufenfrequenz. Dadurch muss bei der Inbetriebnahme äußerst selten ein Nullpunktabgleich erfolgen und das Messsystem arbeitet mit einer Systemgenauigkeit von ± 0,5 % vom Messwert wie ein Gleichfeldgerät. Die Durchflussaufnehmer erhalten zusätzlich eine erweiterte Durchflussaufnehmerdiagnose mit der der Anwender zusätzliche Informationen für eine eventuell anstehende Überprüfung der Messanlage erhält. Die Kommunikation ist über HART, PROFIBUS PA und FOUNDATION Fieldbus möglich.

Positionierung der Messumformer

Entsprechend den Forderungen des Anwenders ist die Gestaltung des IDM-Systems unterschiedlich. Die verschiedenen Varianten des Aufnehmers wurden bereits erwähnt. Beim Messumformer geschieht diese Anpassung durch Gehäusezuordnungen. Zwei markante Konstruktionen sind die räumlich vom Aufnehmer getrennten Messumformer und die räumlich mit dem Aufnehmer verbundenen Kompaktgeräte.



Bild 2-84: IDM-Aufnehmer und Messumformer im Wandaufbaugehäuse

Die **Kompaktausführung COPA-XE** oder **COPA-XM** vereinigt Aufnehmer und Messumformer in einem Gehäuse, wobei die örtliche Bedien- und Ablesemöglichkeit sichergestellt ist. Der große Vorteil dieser Varianten ist, dass die Zwischeninstallation von Elektrokabeln entfällt.

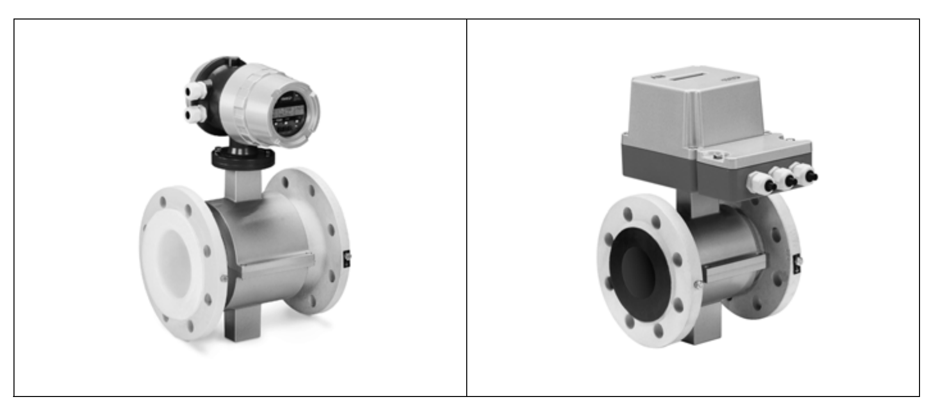


Bild 2-85: COPA-XE in Kompaktausführung **Bild 2-86:** COPA-XM in Kompaktausführung

Eine interessante Variante ist das Kompaktgerät **COPA-XE „d“**, für die Ex-Zone 1. Die Signalein- und -ausgänge dieses Gerätes gibt es in eigensicherer „i“ (nach NAMUR) oder in nicht eigensicherer „e“ (nach PELV) Ausführung, die vor Ort umschaltbar sind.



Bild 2-87: COPA-XE „d“, der Kompakt-IDM mit Messumformer im druckgekapselten Gehäuse

Einfache Dateneingabe des Messumformers von außen in der Ex-Zone 1 mit Magnetstift, das bedeutet die Anwendung im Ex-Raum ohne Eingrenzung. Selbstverständlich ist die Bedienung und Ablesung bei allen Betriebsbedingungen möglich sowie eine Kommunikation über HART oder PROFIBUS PA oder FOUNDATION Fieldbus.

COPA-XT – Der erste 2-Leiter-IDM für den industriellen Einsatz

Bei den bekannten Messverfahren sind schon etliche Geräte in 2-Leiter-Technik, z. B. Drucktransmitter, Wirbel-Durchflussmesser, Schwebekörper-Durchflussmesser und andere Messsysteme ausgeführt. Die Versorgung der bekannten Systeme arbeiten mit einem eigensicheren 4...20 mA-Einheitssignal. Mit dem HART-Protokoll steht eine industrieerprobte digitale Kommunikationsmöglichkeit unter Weiterverwendung der vorhandenen 4...20 mA-Installation für Feldgeräte zur Verfügung. Das Protokoll kann zum Übermitteln von Mess-, Stell- und Gerätedaten verwendet werden und ermöglicht darüber hinaus eine umfassende Systemintegration über Leitgeräte.

Die üblichen magnetisch-induktiven Durchflussmesser benötigen eine höhere Energie als 4...20 mA, d. h. dass die Spannungsversorgung üblicherweise nicht eigensicher ausgeführt ist. Die Signal Ein-/Ausgänge, z. B. Stromausgang können zwar eigensicher ausgeführt sein, auch in Verbindung mit HART-Protokoll, aber die nicht eigensichere Spannungsversorgung bedeutet immer einen höheren Installations-Aufwand. Der 2-Leiter-IDM von ABB Automation Products ist ein Messsystem mit einer Versorgungsspannung wie bei allen anderen Geräten in 2-Leitertechnik auch, d. h. das Gerät versorgt sich ausschließlich aus dem 4...20 mA-Einheitssignal.

Durch die innovative Magnetfelderzeugung wird die Energie gespeichert und mit Hilfe eines speziellen Treiberkreises nach der bewährten Gleichfeldtechnik, die im wesentlichen durch eine durchflussproportionale Erregerfrequenz ergänzt wurde, verwendet. Auf Grund der intern gespeicherten Energie kann der IDM nicht als eigensicheres Betriebsmittel ausgeführt werden, jedoch werden durch Kombination anderer Zündschutzarten (II 2G EEx emd [ib] IIC T3...T6) der Ex-Schutz für den Einsatz in Kategorie 2G (Zone 1) erreicht. Darüber hinaus bietet der 2-Leiter-IDM ein Vorort-Display und einen zusätzlichen Binärausgang über Schaltverstärker. Der konfigurierbare Binärausgang kann zusätzlich zur Impulszählung, Alarmkontakt, Max.-Min.-Alarm etc. eingesetzt werden.



Bild 2-88: COPA-XT in Ex-Ausführung **Bild 2-89:** COPA-XT Standard-Ausführung

Die 2-Leitertechnik reduziert die Installationskosten pro Messstelle, die Energiekosten werden gesenkt, denn der IDM benötigt max. 0,5 Watt und eine einfache Lagerhaltung durch Standardisierung lässt sich somit realisieren.

Miniflow und COPA-XL – Die neue Alternative für einfache Durchflussmessung

Eine Alternative zu den bisher genannten Geräten bietet der magnetisch-induktive Durchflussmesser **Miniflow** und **COPA-XL**. Er wurde speziell für einfache Durchflussmessungen, die keine besonderen Anforderungen stellen, entwickelt.

Der Nennweitenbereich reicht von DN 10 (1/2"-Gewindeanschluss) bis DN 50 (2"-Gewindeanschluss) beim Miniflow und beim COPA-XL von DN 10...DN 300. Bei beiden Geräten ist der Messumformer direkt auf dem Messrohr aufgebaut. Die komplette Einheit ist sehr kompakt, besitzt ein geringeres Gewicht und ist schnell über den Gewindeanschluss in die Rohrleitung einzubauen. Der elektrische Anschluss des Gerätes erfolgt über Stecker. Neben dem zweizeiligen Display, das den momentanen Durchfluss und den Zählerstand anzeigt, bieten beide Geräte als elektrisches Ausgangssignal einen durchflussproportionalen 20 mA-Ausgang und einen Impulsausgang. Die Geräte werden über die Folientastatur bedienergeführt, mit Klartextmeldungen im Display, eingestellt.



Bild 2-90: Miniflow



Bild 2-91: COPA-XL

Füll-MAG – das intelligente Abfüll- und Dosiersystem

Genaues Abfüllen bzw. Dosieren mit hoher Reproduzierbarkeit stellt bei kleinen wie auch bei großen Gebinden oft ein Problem dar. Diese Problematik hat **ABB** aufgegriffen und bietet für diese Applikationen mit dem Füll-MAG-System (bzw. COPA-XF) eine Lösung mit magnetisch-induktiven Durchflussmessern an.

Je nach Applikationsbedingungen (Medium, Abfüll- und Dosierzeit, Rahmenbedingungen, etc.) können auch Masse-, Wirbel- und Drall-Durchflussmesser für Batch-Prozesse eingesetzt werden. Steuerungstechnisch bietet der Masse-Durchflussmesser den selben Komfort wie ein Füll-MAG-System (nähere Informationen über diese Geräte siehe jeweilige Gerätebeschreibung).

Mit dem Füll-MAG steht ein sehr kompaktes und intelligentes magnetisch-induktives Messsystem zur Verfügung, das in seiner schnellen Ansprechzeit, einer speziellen Software für Chargenprozesse und Abfüllapplikationen sowie der CIP/SIP-Reinigungsfähigkeit des mechanisch verschleißfreien Aufnehmers seine Stärken hat. Diese spezielle Software ermöglicht Abfüllungen und Dosierprozesse mit Messzeiten $\geq$ 500 ms, bei einer Reproduzierbarkeit von $\leq$ 0,2 % vom Messwert. In Abfüllsystemen ist eine automatische Nachlaufmengenerfassung und -korrektur mit programmierbarer Mittelwertbildung, welche ventilbedingt ist, von großer Bedeutung. Denn nur Systeme wie der Füll-MAG, die diese Einflüsse und die unterschiedlichsten Rahmenbedingungen kompensieren können, bringen gute, reproduzierbare Messergebnisse.

Gerätetechnik

Das Füll-MAG System ist in getrennter Technik ausgeführt. Der Messumformer steht in 19"-Version und als Feldgehäuseausführung zur Verfügung. Bei den Edelstahlaufnehmern kann als Prozessanschluss zwischen allen handelsüblichen Prozessanschlüssen gewählt werden. Auch kundenspezifische Anschlussvarianten sind möglich.

Das Füll-MAG System arbeitet mit definierten Ein- und Ausgangskontakten (Bild 2-92). Vier unterschiedliche Abfüll- und Vorkontaktmengen können direkt im Messumformer eingestellt und über einen Abfüllmengenauswahlschalter oder mittels PC, bzw. einer SPS oder ein Prozessleitsystem angewählt werden.

Der Abfüllvorgang wird durch ein Startsignal eingeleitet und das Ventil geöffnet. Nach Erreichen der Vorkontakt- bzw. Endkontaktmenge steuert der Messumformer direkt das Abfüllventil. Mit der Schnittstelle RS 485 können bis zu 32 Messumformer verknüpft und mittels einer Bedienstation, SPS oder Messumformerdialogeinheit konfiguriert werden. Die Anbindung anderer Komponenten wie Regelkreise, Kontrollorgane (Waage) sowie Drucker ist auch möglich.

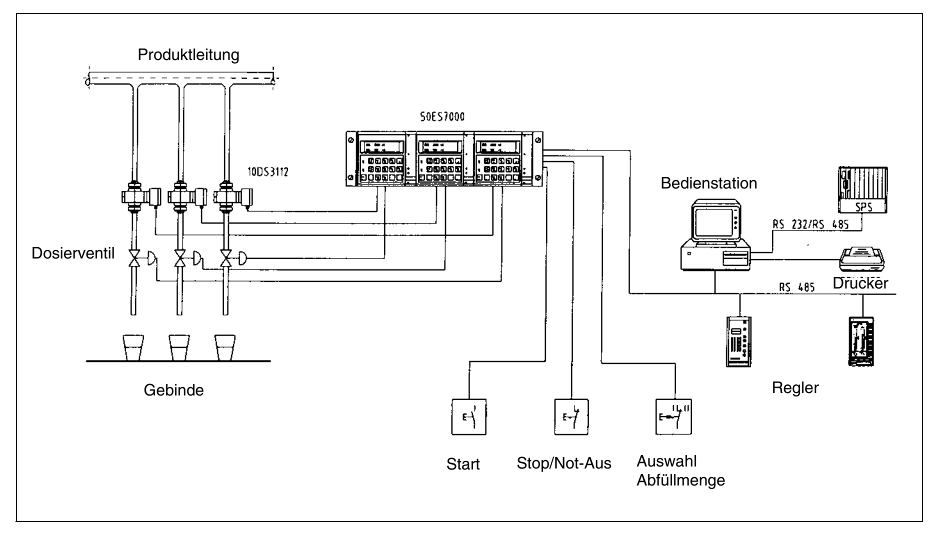


Bild 2-92: Schema einer Abfüllanlage mit übergeordneter Rezeptursteuerung, Regelung und Integration in ein PL-System

Besondere Merkmale des Füll-MAG Systems sind weiterhin:

- Für schnelle sowie auch kontinuierliche Abfüllvorgänge und Chargenprozesse von Kleinstmengen bis hin zur Containerbefüllung geeignet.
- Nennweiten von DN 1 mm...DN 400 mm.
- Genauer, reproduzierbarer Abfüllvorgang und daraus resultierend eine Verringerung der Sicherheitsüberfüllungen.
- Überprüfung auf Einhaltung der freiprogrammierbaren Über- und Unterfüllgrenze nach jeder Abfüllung.
- Automatische Sicherheitsabschaltung über die max. Abfüllzeit bzw. der Systemüberwachung durch den Messumformer.

Einstufiger bzw. Zweistufiger Abfüllvorgang

Um eine hohe Reproduzierbarkeit bei Abfüllungen bzw. Dosierungen zu erreichen, sind neben dem Durchflussmesssystem Komponenten wie Ventil, gute Druck- und Niveauregelung sowie das Anlagenkonzept von entscheidender Bedeutung.

Einer der wichtigsten Punkte ist die Güte des Füllventils (schnelle Ansprechzeit, reproduzierbares Schließverhalten). Durch das Schließverhalten des Ventils ergibt sich, bedingt durch die Ventilschließzeit, eine Nachlaufmenge. Diese wird, nach Erreichen der eingestellten Abfüllmenge und Schließen des Ventils durch einen vom Messumformer gesetzten Endkontakt, von der Messumformerelektronik gemessen und über einen speziell dafür entwickelten Regelalgorithmus korrigiert.

Um die ermittelte Nachlaufmenge wird bei der nachfolgenden Abfüllung der Endkontakt früher gesetzt. Somit werden sich kontinuierlich ändernde Nachlaufmengen erkannt und, im Gegensatz zu Abfüllungen mittels externem Vorwahlzähler, automatisch korrigiert. Die Streuung der Nachlaufmenge ist letztlich entscheidend für die Reproduzierbarkeit der Abfüllung. Durch Verwenden des Vorkontaktes (Zweistufiger Abfüllvorgang, Bild 2-93) und damit Reduzierung des Volumenstromes kann die Nachlaufmenge verringert und somit die Reproduzierbarkeit verbessert werden. Voraussetzung ist jedoch eine annähernd gleiche Füllkurve, die vom Ventil, dem Vordruck, dem Anlagenkonzept und letztlich vom Produkt abhängig ist.

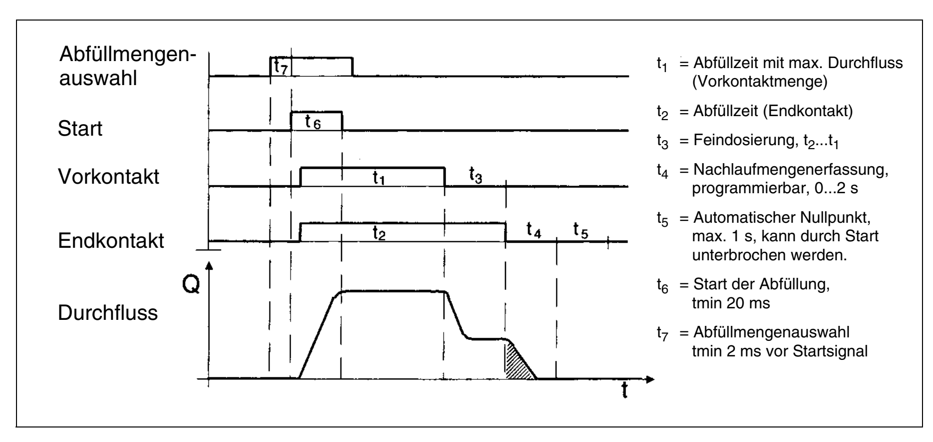


Bild 2-93: Zweistufiger Abfüllvorgang

Bei sehr kurzen Abfüll- und Dosierzeiten (ca. 3 s) empfiehlt es sich jedoch, die Steuerung des Ventils nur über den Endkontakt (Einstufiger Abfüllvorgang, Bild 2-94) vorzunehmen. Vor- wie Endkontakt sind frei programmierbar.

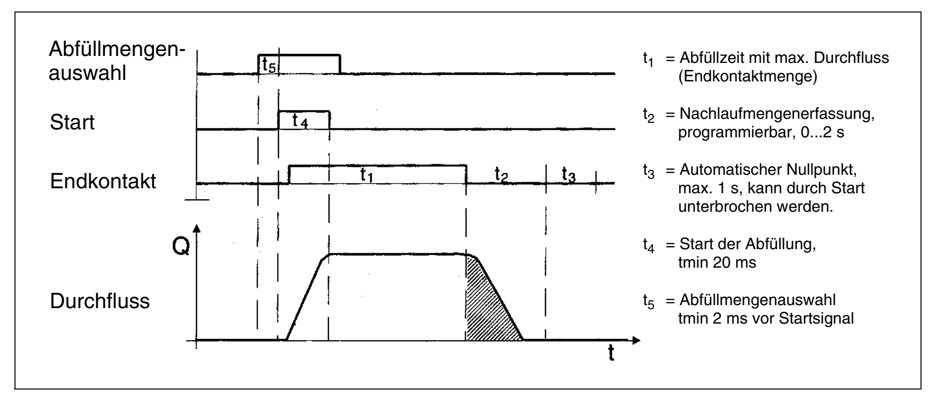


Bild 2-94: Einstufiger Abfüllvorgang

Eichfähigkeit

Das Messsystem ist von der PTB in Braunschweig eichfähig zugelassen. Zulassungen einer Vielzahl von Medien liegen bereits für den Füll-MAG vor. Ein spezieller Einsatzbereich dieses IDM-Typs ist die KEG-Befüllung, sowie die Messung chemischer Produkte. Eine betriebsmäßige Protokollierung der Abfüllungen, eine zentrale Datenerfassung sowie zur Einstellparameter-Protokollierung für ein Übergabeprotokoll ist möglich. Je nach selektiertem Druckerprotokoll (4 verschiedene Protokolle) werden unterschiedliche Datensätze über den Drucker für Statistikzwecke protokolliert.

Das zuvor beschriebene Füll-MAG-System bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten für die Automatisierung unterschiedlichster Prozesse. Eine schnelle Amortisierung des Investitionsumfanges wird durch Reduzierung auf die tatsächlich benötigte Abfüllmenge sowie der Sicherheitsüberfüllungen und somit Produkteinsparungen, Verbesserung der Produktqualität, Produktivitätssteigerungen sowie einer Gewinnoptimierung der Prozesse durch Reduzierung der Betriebs-, Wartungs- und Servicekosten erreicht.

Magnetisch-induktive Durchflussmesser bieten ferner überzeugende Vorteile gegenüber den bestehenden mechanischen Abfüll- und Dosiersystemen mit Dosierkolben oder -pumpen, Zwischen- bzw. Vordosierbehältern, Flügelradzählern oder Turbinen-Durchflussmessern sowie Wägesystemen.

Vorteile sind unter anderem:

- Verschleißfreies und wartungsarmes System
- CIP/SIP-Fähigkeit des Durchflussmessers und somit Reduzierung der Reinigungs- und Sterilisationszeiten.
- Kürzeste Füllzeiten bei unterschiedlichsten Abfüllmengen durch große Messbereichsspanne möglich.
- Hoher Produktionsausstoß durch optimale Auslastung der Anlage, da Ansaugphase bzw. Tara-Ermittlung wie bei mechanischen Systemen entfällt.
- Kommunikationsfähigkeit des Messsystems, mit integrierten Stastistikfunktionen.

COPA-XF, der Durchflusssensor

Der COPA-XF (Bild 2-95) ist ein Kompaktgerät, wobei der Messumformer direkt auf den Aufnehmer montiert wird. Aufnehmer, Prozessanschlüsse sowie Messumformergehäuse sind in Edelstahl ausgeführt. Auf Grund seiner geringen Abmessungen ist er ideal für die Batteriemontage in großen Rund- und Reihenfüllern geeignet. Er kann ebenfalls für die kontinuierliche Durchflussmessung eingesetzt werden, wenn als Ausgangssignal lediglich ein Impuls- bzw. Stromausgang, jedoch **kein** Display für die Anzeige benötigt wird. Die Reproduzierbarkeit des Gerätes beträgt 0,2 % vom Messwert bei Füllzeiten größer 2...4 Sekunden.

Lieferbar ist er in den Nennweiten DN 3 mm...DN 100 mm. Als Prozessanschlüsse stehen alle handelsüblichen Prozessanschlüsse zur Verfügung. Auch kundenspezifische Anschlussvarianten sind möglich. Als Hilfsenergie werden 24 V DC benötigt. Für raue Betriebsbedingungen besitzt der COPA-XF einen Anschluss für die Beaufschlagung des Gerätes mit Instrumentenluft. Ferner können die Geräte in tropenfester Ausführung mit lackierten Leiterplatten ausgeführt werden.

Die zweite Generation des COPA-XF bietet die Möglichkeit von **3 unterschiedlichen Betriebsarten**. Neben der **Betriebsart „Batch“** für Abfüll- und Dosierprozesse mit der Funktion als durchflussproportionalem Durchflusssensor und einem 1, 2, 5 KHz bzw. normierbaren Impulsausgang, steht die **Betriebsart „Konti“** für kontinuierliche Messungen mit einem zusätzlichen Stomausgang 0/4...20 mA zur Verfügung. Die **Betriebsart „Abfüller“** beinhaltet die Funktion eines stand-alone Abfüllsystems und basiert in den Grundzügen bzw. den wichtigsten Funktionen auf der lang bewährten Füll-MAG Technik.

Im Gegensatz zum intelligenten Füll-MAG-System bzw. der Betriebsart „Abfüller“ beim **COPA-XF**, kann der COPA-XF mit den **Betriebsarten „Batch“** oder **„Konti“** als reiner Durchflusssensor bezeichnet werden.

Hierunter versteht man einen IDM, der lediglich einen Frequenz- bzw. Stromausgang und normierbaren Impulsausgang besitzt. Um mit diesem Gerätetyp eine Abfüllung oder Dosierung zu realisieren, bedarf es weiterer Hard- und Software als übergeordneter Auswerteelektronik. Von der Technik sowie Reproduzierbarkeit der Messwerte

steht er bei längeren Abfüllzeiten (92...4 s) dem Füll-MAG-System in nichts nach. Er liefert lediglich als Ausgang ein durchflussproportionales Frequenzsignal. Die wertigkeitsbehafteten Impulse müssen mittels Vorwahlzähler, PC, SPS oder PLS aufsummiert und weiterverarbeitet werden.

Abfüllmengenvorwahl, Realisierung einer ein- oder zweistufigen Abfüllung, Start/Stop-Funktion, Nachlaufmengen-Erfassung und -Korrekturen, Kontroll- bzw. Überwachungsfunktionen sowie das Schalten der Ventile obliegen bei Durchflusssensoren der nachgeschalteten Auswerteelektronik. Diese Elektronik bzw. Software ist gravierend mitbestimmend für die Güte einer Abfüll- und Dosieranlage sowie der Reproduzierbarkeit der Abfüllungen. Das Bild 2-97 zeigt das Schema eines solchen Abfüllsystems.



Bild 2-95: Durchflusssensor COPA-XF, Standard



Bild 2-96: COPA-XF in Kompaktausführung mit Kommunikationsmöglichkeit (hier mit MDE 55 HT 4000)

Ausschlaggebend für die Entwicklung eines solchen Durchflusssensors war die Marktanforderung, einen preisgünstigen, kleinen und leistungsstarken Kompakt-IDM in Edelstahlausführung für Mehrventilfüller bis zu 168 Füllventilen zu entwickeln.

Bedingt durch die stattliche Anzahl an Füllventilen pro Anlage sowie der Möglichkeit, die benötigte Software eigenständig entwickeln und gestalten zu können, macht dieses Anlagenkonzept preislich und technisch interessant.

Einmalig entwickelte Software sowie Know-how kann auf eine Vielzahl von Anlagen übertragen werden. Jeder Anlagentyp kann mit den preisgünstigen Standard-Durchflusssensoren ausgestattet werden, erhält jedoch durch die hauseigene Software unterschiedliche Bedienoberflächen sowie anlagenspezifische Komponenten.

Da bereits Zentralrechner für andere Steuerungsaufgaben auf den Abfüllmaschinen installiert sind, können diese die Signalverarbeitung, die Abfüllmengenvorgabe und notwendige Korrekturen sowie Schaltfunktionen der Ventile übernehmen.

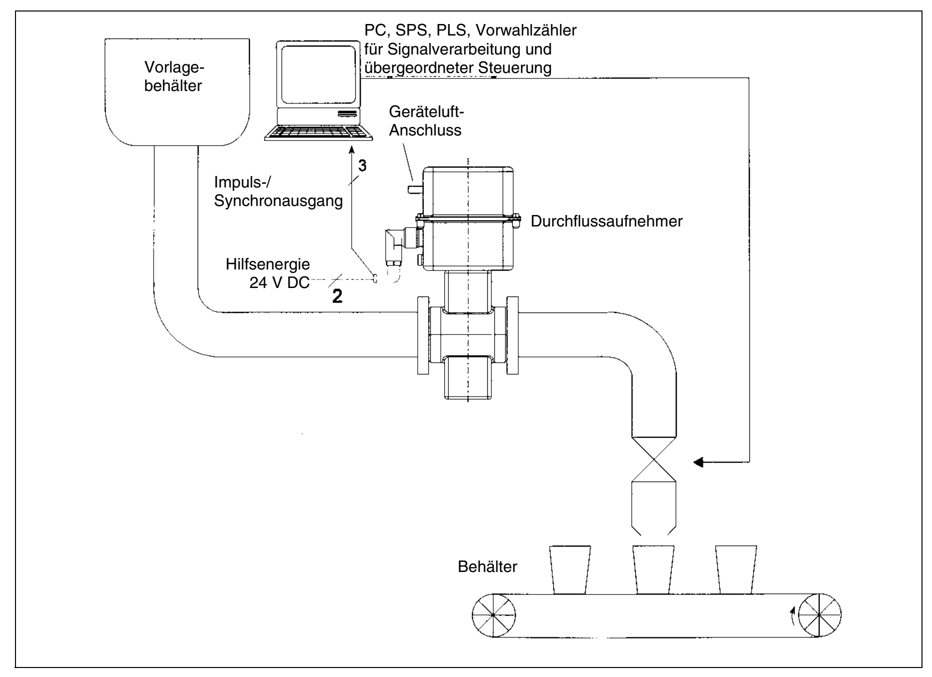


Bild 2-97: Schema eines Abfüllsystems mit dem magnetisch-induktiven Durchflussmesser COPA-XF

Kommunikationsmöglichkeiten

Für die Parametereinstellung und -Kontrolle des COPA-XF sind zwei Möglichkeiten gegeben. Nach Öffnen des Gehäusedeckels kann die Messumformerbedieneinheit 55BE1000 mit Display im Servicefall an den Messumformer angesteckt werden.

Sind Parameterverstellungen im Prozess notwendig bzw. werden Informationen aus dem laufenden Betrieb der Anlage benötigt, bietet die Implementierung einer RS 485-Schnittstelle im Gerät viele Möglichkeiten.

Mittels ASCII-Protokoll oder zukünftig über PROFIBUS DP ist eine Kommunikation mit einem Prozessleitsystem, einer speicherprogrammierbaren Steuerung oder einem PC und der jeweiligen individuellen Software gegeben. Der Anschluss erfolgt über einen separaten Kommunikationsstecker.

Eine Komplettlösung für die Überwachung des COPA-XF und der Verstellung von Parametern, ohne Öffnen des Gehäusedeckels, bietet die Dialogeinheit 55HT4000 mit Display.

Sie wird lediglich an die Kommunikationsbuchse am Gerät angesteckt. In der Betriebsart „Dialogeinheit“ besteht die Möglichkeit einer 1:1-Kommunikation mit jeweils nur einem Gerät. Die Betriebsart „Zentralverstellung“ bietet eine parallele Kommunikation mit max. 4 Messumformern.

Diese neue Anlagengeneration von volumetrisch arbeitenden Füllmaschinen mit magnetisch-induktiver Durchflussmessung anstelle von Füllsystemen mit Zwischen- bzw. Vordosierbehältern (Einschränkungen bei der Mediumvielfalt sowie Füllzeit) oder Wägesystemen, nutzt die vielen Vorteile, die ein IDM-System bietet. Durch CIP/Sip-Fähigkeit, verschleißfreie und wartungsarme Technik, Viskositätsunabhängigkeit sowie der großen Messspanne des IDMs, welches ein schnelles, problemloses Umstellen der Abfüllmenge ermöglicht, werden Qualitätsverbesserungen, Produkteinsparungen durch Vermeidung von Überfüllungen, Produktivitätssteigerungen sowie Kostenreduzierungen erreicht.

IDM-Dimensionierung

Der Anwender gibt die Nennweite des IDM-Aufnehmers mit seiner Rohrleitung vor. Die Kontrollrechnung mit dem aktuellen Durchflusswert sollte dieselbe Nennweite ergeben. Andernfalls muss die Rohrleitung angepasst werden.

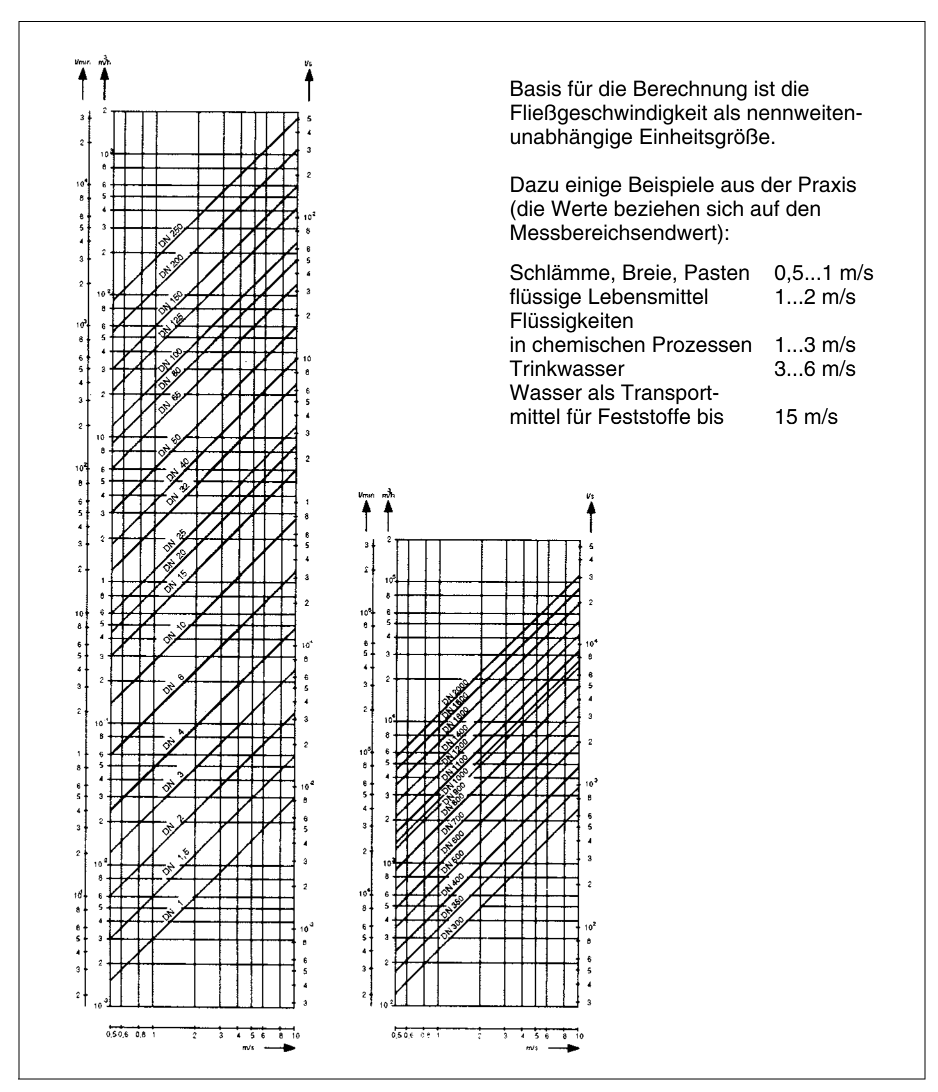


Bild 2-98: Nennweitenabhängige Durchflusswerte

Mit Hilfe des Nomogramms Bild 2-98 lässt sich die gesuchte Gerätegröße bestimmen. Würde man mit den Daten des Nomogramms den Rohrdurchmesser errechnen, so kann es Unterschiede zwischen dem Rechenwert und dem tatsächlich messbaren Durchmesser geben. Das ist bedingt durch unterschiedliche Auskleidungsstärken, wird aber messtechnisch durch die Kalibrierung ausgeglichen.

Gelegentlich weichen Rohrgröße und errechnete IDM-Nennweite voneinander ab, und zwar ist dann in der Regel der IDM kleiner. Eine Anpassung durch konische Flanschübergangsstücke ist möglich, wenn der Einschnürungswinkel kleiner als 8° ist.

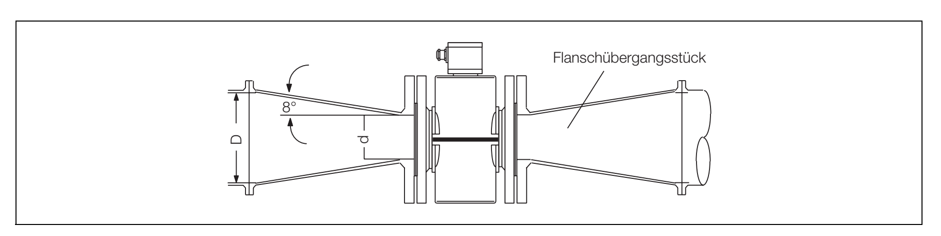


Bild 2-99: Einschnürung an der Messstelle

Der durch die 8°-Einschnürung entstehende Druckverlust lässt sich mit Hilfe des Nomogramms Bild 2-100 errechnen. Dazu wird das Durchmesserverhältnis d/D ermittelt und die aktuelle Fließgeschwindigkeit v aus der Kurvenschar herausgesucht. Der Schnittpunkt beider Größen gibt auf der Ordinaten den Druckverlust Δp an.

Druckverlustdiagramm für IDM
Flanschübergangsstück mit a/2 = 8°

Druckverlust Δp [mbar]: 100, 10, 1

v=8m/s, 7m/s, 6m/s, 5m/s, 4m/s, 3m/s, 2m/s, 1m/s

0,5 0,6 0,7 0,8 0,9

Druckmesserverhältnis „d/D“

Bild 2-100: Druckverlust bei Rohreinschnürung

Technische Daten

Signalabgriff	galvanisch		
Magnetfelderregung	IDM mit geschalteter Gleichfelderregung		
Modell	**COPA-XE MAG-XE**	**COPA-XM MAG-XM**	**COPA-XF**
Auskleidungswerkstoff Hartgummi Weichgummi PTFE PFA Peek Torlon	DN PN 15...1000 10...40 65...1000 10...40 10... 800 10...40 3... 100 10...40 – – – –	DN PN 15...2000 6...40 50...2000 6...40 10... 800 10...40 3... 100 10...40 1... 2 10...40 1... 2 10...40	DN PN 3...100 10...40
Elektrodenwerkstoff	bei Hart-/Weichgummi-Auskleidung: Standard Niro W.-Nr. 1.4571, Option Hastelloy C oder B; bei PTFE/PFA-Auskleidung: Standard Hastelloy C, Option Hastelloy B, Ti, Ta, Pt-Ir		
Erregerfrequenz	6 1/4 Hz, 12 1/2 Hz oder 25 Hz		12,5/25 Hz
Min. Leitfähigkeit	5 µS/cm		
Max. mögl. Druckstufe	PN 250		PN 40
Max. mögl. Temperatur	180 °C		130 °C
Elektrodenausführung	Standard-, Spitz-Elektrode, herausnehmbare Elektroden als Option bei Nennweite ≥ DN 350 und bei Auskleidung Hartgummi		
Prozessanschluss	Flansch: DN 15...2000 Hart-/Weichgummi, DN 10...600 PTFE, DN 3...100 PFA. Zwischenflansch: DN 3...100 PTFE, PFA. Aseptische Rohrverschr.: DN 3...100 PFA. Tri-Clamp: DN 3...65 PFA 1/8" Sanitär-anschluss DN 1...2 Peek, Torlon		var. Prozess-anschluss DN 3...100 PFA
Messbereichsendwert	0,5...10 m/s	0,5...15 m/s	0,5...10 m/s
Max. Messwert-abweichung	0,5 % v. Messwert	0,4 % v. Messwert opt. 0,2 % v. Messwert	0,5 % v. Messwert ≤ 0,2 % Reprodu-zierbarkeit
Stromausgang	0...5 mA, 0/2...10 mA, 0/4...20 mA, 0...10...20 mA, 4...12...20 mA einstellbar		
Bürde	0...600 Ω	0...1000 Ω	0...600 Ω
Impulsausgang	Optokoppler, Aktiv	Optokoppler, Aktiv optional Relais	Opto, Aktiv
Impulsbreite	Impulsbreite von 0,1 ms...2000 ms einstellbar		1,25
Hilfsenergie	Schaltnetzteil 85...253 V AC 16,8...26,4 V AC 16,8...31,2 V DC	24, 115, 230 V 24 V DC 50/60 Hz 24 V DC	16,8...31,2 V DC
Aut. Leerlaufabschaltg.	ja ≥ DN 10	ja ≥ DN 10	Betriebsarten
Max.-Min.Alarm	ja	ja	• kontinuierlich
2 Messbereiche	nein	ja	• Batch
Vorwahlzähler	nein	ja	• Füller

Tab. 2-6: Übersicht der Aufnehmer- und Messumformerausführungen

Technische Daten

Signalabgriff	kapazitiv	galvanisch	
Magnetfelderregung	IDM mit geschalteter Gleichfelderregung	IDM mit Wechselfeld-erregung	
Modell	**MAG-CM COPA-CM**	**Füll-MAG**	**FSM4000**
Auskleidungswerkstoff	DN PN	DN PN	DN PN
Hartgummi	nein	15...400 10...40	15...1000 10...40
Weichgummi	nein	nein	50...1000 10...40
ETFE	25...300 10...40	10...300 10...40	10... 300 10...40
PTFE	nein	10...400 10...40	10... 600 10...40
PFA	nein	3...100 10...40	3... 100 10...40
Peek	nein	1... 2 10	1... 2 10
Torlon	nein	1... 2 10	1... 2 10
Elektrodenwerkstoff	Kapazitiver Signal-abgriff	bei Hart/Weichgummi Auskl.: W.-Nr.1.4571, bei PTFE/PFA Auskleidung: Hastelloy C, bei Aseptische Rohrverschraubung: 1.4539	
Erregerfrequenz	12 1/2 Hz/15Hz/ 25 Hz DC	50/60 Hz AC	50/60/70 Hz AC
Min. Leitfähigkeit	0,05 µS/cm	20 µS/cm, Option: 5 µS/cm oder 0,5 µS/cm	
Max. mögl. Druckstufe	PN 40	PN 250	PN 250
Max. mögl. Temperatur	100 °C	150 °C	180 °C
Elektrodenausführung	Kapazitive Elektrode hinter der Auskleidung	Standard-, Spitz-Elektrode	
Prozessanschluss	Edelstahl	Flansch, Zwischenflansch, Aseptische Rohrverschraubung, Tri-Clamp, andere auf Anfrage	
Messbereichsendwert	0,5...15 m/s	0,5...10 m/s	0,5...10 m/s
Max. Messwert-abweichung	1 % vom Messwert	1 % vom Messwert 0,2 % Reproduzier-barkeit	0,5 % vom Messwert 0,2 % Reproduzier-barkeit
Stromausgang	0/4...20 mA; 0/2...10 mA; 0...5 mA einstellbar		0/4...20 mA; 0/2...10 mA
Bürde	0...1000 Ω	0...550 Ω	
Impulsausgang	Aktiv, passiv	Aktiv, passiv	
Hilfsenergie	24, 115, 230 V 50/60 Hz 24 V DC	24, 115, 230 V 50/60 Hz	20,4..26,4 V AC; 20,4...31,2 V DC 100...230 V AC
Autom. Leerlauf-abschaltung	nein	ja (außer mit Impedanzwandler)	
Max.-Min.-Alarm 2 Messbereiche Vorwahlzähler	ja ja ja	nein ≥ DN 10 nein ≥ DN 10 nein ≥ DN 10	ja ≥ DN 10 ja ≥ DN 10 ja ≥ DN 10

Tab. 2-7: Übersicht der Aufnehmer- und Messumformerausführungen

Aquaprobe – die Durchflusssonde

Eine Sonderstellung bei den magnetisch-induktiven Durchflussmessverfahren nimmt die Durchflusssonde **Aquaprobe** ein. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen induktiven Durchflussmessern wird die Durchflusssonde von außen, ohne Zertrennen der Rohrleitung über einen Stutzen eingebaut. Dieses minimiert die Montagekosten.

Der Einbau kann bei laufendem Betrieb sogar in die unter Druck stehende Rohrleitung erfolgen. Das Magnetfeld der Aquaprobe durchsetzt nicht wie bei dem IDM den gesamten Rohrquerschnitt. An einem repräsentativen Punkt im Rohrquerschnitt wird die Fließgeschwindigkeit ermittelt und der Durchfluss im Messumformer berechnet. Die Aquaprobe eignet sich sowohl für den stationären, als auch für den mobilen Einsatz. Besondere Anwendungsgebiete sind Durchflussmessungen im Trinkwassernetz. Hier kann mit der Aquaprobe der Durchfluss und die Fließrichtung in einzelnen Abschnitten des Leitungsnetzes ermittelt werden. Auch bei sehr kleinem Durchfluss bleibt die Messgenauigkeit von 2 % vom Messwert erhalten. Damit eignet sich die Aquaprobe auch zur Lecküberwachung im Trinkwassernetz.

Über den am Sensor vorhandenen ½“-Anschluss kann ein Druckmessgerät an die Aquaprobe angeschlossen werden. Damit ist neben der Durchflussmessung auch eine Druckmessung möglich. Im Trinkwassernetz sind mit Hilfe dieser beiden Messwerte (Druck und Durchfluss) Rückschlüsse auf Inkrustrierungen/Ablagerungen in der Rohrleitung möglich. Inkrustrierungen/Ablagerungen beeinflussen z. B. im Brandfall den max. aus der Leitung entnehmbaren Löschwasserdurchfluss.

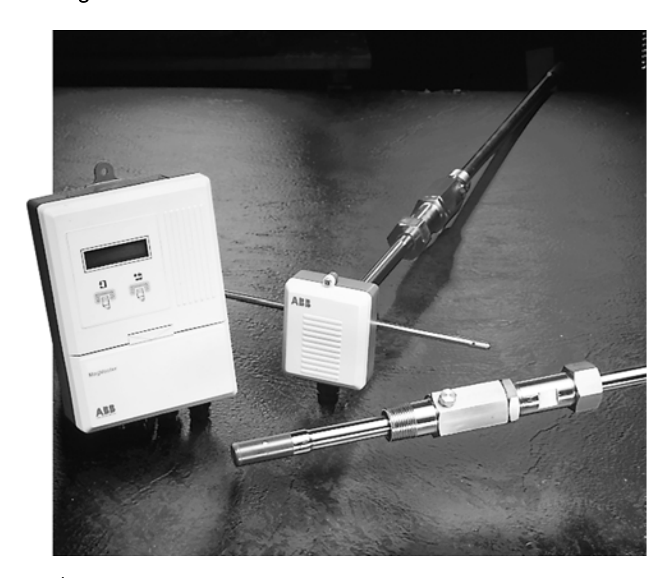


Bild 2-101: Aquaprobe

2.2.4 Ultraschall-Durchflussmesser

Die **Schallgeschwindigkeit** c ist als Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Schallwellen in einem Medium eine stoffspezifische Größe. Sie ist abhängig von der Dichte des Mediums. Die Dichte ist bei Flüssigkeiten eine Funktion der Temperatur und bei Gasen eine Funktion der Temperatur und des Druckes. Wird ein Schallimpuls von einem Ort A gesendet, so erreicht er den zweiten Ort B nach der Zeit:

$$t = \frac{l}{c}$$

Die Zeit ändert sich dann, wenn sich der Schallträger selbst bewegt, und zwar durch die Addition der Schallgeschwindigkeit im Medium und der Geschwindigkeit des Mediums. Dieser Mitführungseffekt wird beim Ultraschall-Durchflussmessgerät genutzt.

Für die Ultraschall-Durchflussmessung gibt es zwei grundlegende Methoden:

1. Laufzeitverfahren
2. Dopplerverfahren

Laufzeitverfahren

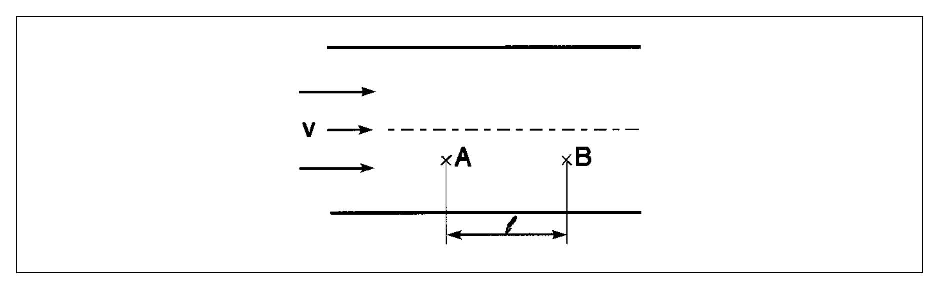


Bild 2-102: Schallstrecke im Flüssigkeitsstrom

Der von einem festem Punkt A abgesandte Schallimpuls bewegt sich mit der Geschwindigkeit c + v und erreicht den Punkt B nach der Zeit t_1:

$$t_1 = \frac{l}{c + v} \qquad (2.29a)$$

Ein von B nach A laufender Impuls benötigt die Zeit t_2:

$$t_2 = \frac{l}{c - v} \qquad (2.29b)$$

Da die Messung von t_2 unmittelbar nach t_1 erfolgt, kann für diese Zeit die Schallgeschwindigkeit c im Medium konstant angenommen werden. Daraus folgt, dass mit

$$c = \frac{l}{t_1} - v \quad c = \frac{l}{t_2} + v$$

die Fließgeschwindigkeit im Medium mit

$$v = \frac{l}{2}\left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2}\right) \tag{2.30}$$

angegeben werden kann. Dieser Messwert ist unabhängig von der Schallgeschwindigkeit, des Druckes, der Temperatur und der Dichte des Mediums.

In der praktischen Geräteausführung wird ein Schallimpuls diagonal durch das Messrohr gesendet. Damit ist die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums

$$v = \frac{l}{2 \cdot \cos\alpha}\left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2}\right)$$

Eine Grundbedingung für die Laufzeitmessung, ist die weitgehende akustische Transparenz des Mediums. Es sollten wenige Festkörper oder Gasblasen im Medium vorhanden sein.

Doppler-Verfahren

Bei der Ultraschall-Durchflussmessung mit Hilfe des Doppler-Effekts müssen Inhomogenitäten oder Verunreinigungen (Streuer) im zu messendem Medium vorhanden sein, damit ein Teil der Schallenergie reflektiert werden kann.

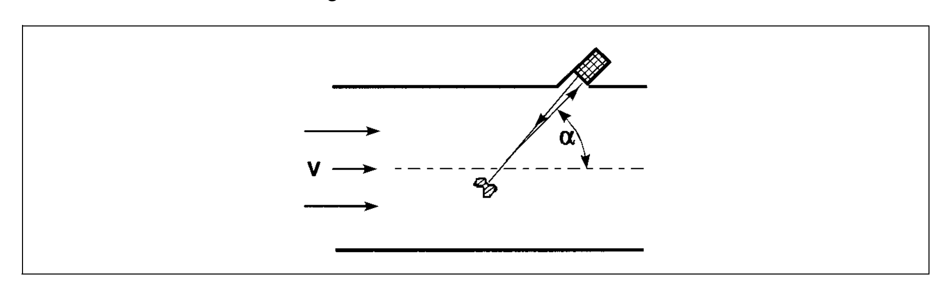


Bild 2-103: Schema des Doppler-Prinzips

Der mit der Frequenz f_1 auf den Streuer treffende Schall wird vom Streuer reflektiert. Folglich fungiert jeder Streuer im Schallfeld als bewegter Sender mit der Schallfrequenz f_1. Die Frequenzverschiebung df des empfangenen, reflektierten Signals ist eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit und der Schallgeschwindigkeit:

$$\Delta f = 2 \cdot f_0 \cos(\alpha) \cdot \frac{v}{c}$$

Da die Schallgeschwindigkeit von Temperatur, Druck und der Zusammensetzung des Fluids abhängt und kleinere Änderungen dieser Größen bereits die Dopplerverschiebung beeinflussen, ist hier eine geeignete Kompensation vorzusehen. Eine Lösung besteht darin, eine definierte Vorlaufstrecke für den Ultraschall vorzusehen, z. B. eine Schallstrecke aus Harz, in das ein Piezoschwinger eingegossen ist.

Nach dem Brechungssatz von Snellius ist

$$\frac{\cos(\alpha)}{c} = \frac{\cos(\beta)}{c_v}$$

und es folgt

$$\Delta f = 2 \cdot f_0 \cos(\beta) \cdot \frac{v}{c}$$

und damit

$$v = \frac{c_v}{2 \cdot f_0 \cdot \cos(\beta)} \cdot \Delta f = \text{const} \cdot \Delta f$$

Der Faktor $c_v/\cos(\beta)$ ist bestimmbar. Die Dopplerverschiebung ist damit weitgehend unabhängig von der Schallgeschwindigkeit im Fluid. Nur die Schallgeschwindigkeitsänderung in der akustischen Vorlaufstrecke ändert die Dopplerfrequenz. Die Änderung ist jedoch vorher bestimmbar und lässt sich somit herausrechnen.

Grenzen

Für die Ultraschall-Durchflussmessung gilt, dass die Strömungsgeschwindigkeit im engen Bereich des Schallstrahls erfasst wird. Für den gesamten Rohrquerschnitt kann der errechnete Durchfluss nur bei rotationssymmetrischem Strömungsprofil gültig sein. Um das sicherzustellen, sind Einlaufstrecken von bis zu 15 DN und Auslaufstrecken von bis zu 10 DN erforderlich. Man kann die Empfindlichkeit gegenüber Unsymmetrien in der Strömung dadurch verbessern, dass man mit zwei oder mehr Schallwegen arbeitet, die das Strömungsprofil in mehreren Ebenen abtasten.

Einbau

Ultraschall-Durchflussmessgeräte werden in zwei Varianten angeboten. Es gibt **Inline-Systeme** und **Clamp-on-Systeme**. Bei den Inline-Geräten liegen die Ultraschallwandler fest in der Rohrwand und berühren den Messstoff mittelbar oder unmittelbar. Diese Messsysteme können kalibriert werden und erreichen eine Genauigkeit von ± 0,5 % vom Messwert und besser.

Anders ist es bei der Clamp-on-Technologie. Hier werden die Ultraschallwandler von außen auf die Rohrleitung aufgesetzt. Der Schallimpuls muss die Rohrwandung und eventuelle Ablagerungen mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten zweimal durchdringen. Bei der Montage müssen die Brechungs- und Reflexionsgesetze beachtet werden. Die Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit bereitet keine größeren Probleme, jedoch muss die genaue Rohrgeometrie bekannt sein, wenn auf eine Volumengröße umgerechnet werden soll.

Diese Messsysteme können nur trockenkalibriert werden und erreichen damit Genauigkeiten besser ± 2,0 % vom Messwert. Kann aus Betriebsdaten eine Vor-Ort-Kalibrierung durchgeführt werden, lassen sich Genauigkeiten von bis zu ± 0,5 % vom Messwert erreichen.

Technische Daten

Nennweite	DN 25...DN 3000 Ab Nennweite DN 600 werden Clamp-on-Systeme bevorzugt
Fließgeschwindigkeit	1...10 m/s
Messwertabweichung	+ 0,5 % v. E. bei Inline + 2,0 % v. E. bei Clamp-on
max. Temp. Medium	-40 °C...260 °C mit Sonderkonstruktionen bis zu 500 °C und mehr

2.2.5 Coriolis Masse-Durchflussmesser

Messprinzip

Für die Berechnung und Bilanzierung verfahrenstechnischer Prozesse bevorzugt man Massenangaben, die unabhängig von physikalischen Einflüssen sind im Gegensatz zu Volumenangaben. Druck, Dichte, Temperatur, Viskosität verändern die Masse nicht. Deshalb ist der Massedurchfluss eine gefragte Messgröße. Masse lässt sich nur mittelbar messen, z. B. unter Zuhilfenahme des zweiten Gesetzes von Newton, das aussagt, dass Kraft gleich Masse mal Beschleunigung ist. Beim Wiegen bedient man sich der Erdbeschleunigung und wendet dieses Gesetz an.

Wie kann man die Masse von Flüssigkeiten unter Berücksichtigung der genannten Zusammenhänge feststellen? Man muss die Flüssigkeiten in einem rotierenden System beschleunigen und Trägheitserscheinungen registrieren. Dazu greift man auf einen physikalischen Effekt zurück, der den Namen des französischen Mathematikers Coriolis trägt.

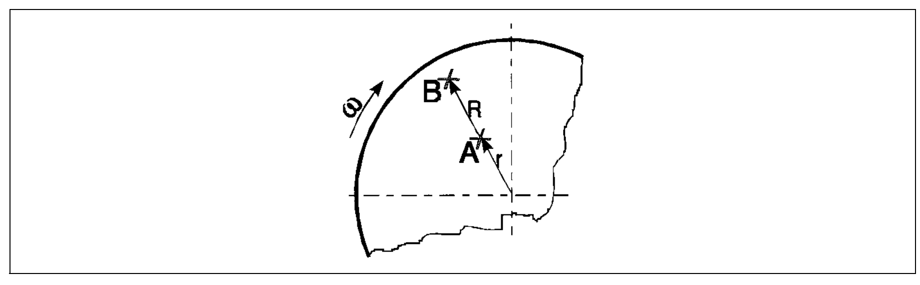


Bild 2-104: Rotierende Scheibe

Auf einer mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotierenden Scheibe befindet sich im Punkt A mit der Mittelpunktentfernung r eine Masse m, die radial nach B mit dem Radius R verschoben werden soll, also an die Stelle mit größerem Drehmoment und größerem Energieinhalt.

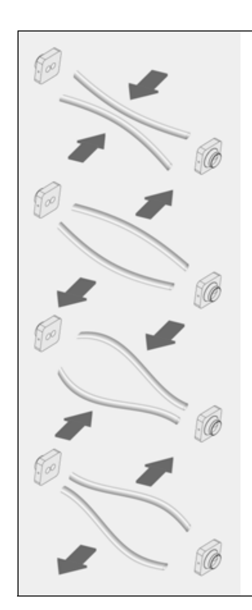
Wird dem System keine Energie zugeführt, so erreicht die Masse m den Punkt B nicht, oder es wird eine andere Größe verändert, nämlich ω. Die Trägkeitskraft, die sich der Veränderung entgegenstellt, ist die Corioliskraft F_c:

$$\vec{F_c} = -2\ m\ (\vec{\omega} \times \vec{v}) \qquad (2.35)$$

v ist die Geschwindigkeit der Masse auf dem Weg von A nach B. Diese Gesetzmäßigkeiten werden auf ein flüssigkeitsgefülltes Rohrsystem übertragen.

Messprinzip: Strömen Massen durch ein vibrierendes Rohr, entstehen Coriolis-Kräfte, die das Rohr verbiegen bzw. verdrehen. Diese sehr kleinen Messrohrverbiegungen werden durch optimal angeordnete Sensoren abgegriffen und elektronisch ausgewertet. Da die gemessene Phasenverschiebung der Sensorsignale proportional zum Massedurchfluss ist, kann mit dem Coriolis-Masse-Durchflussmesser direkt die durch das Messgerät geförderte Masse ermittelt werden.

Das Messprinzip arbeitet unabhängig von Dichte, Temperatur, Viskosität, Druck und Leitfähigkeit. Die Messrohre schwingen immer in Resonanz. Diese sich einstellende Resonanzfrequenz ist eine Funktion der Messrohrgeometrie, der Werkstoffeigenschaften und der im Messrohr mitschwingenden Mediumsmasse. Sie gibt eine genaue Aussage über die Dichte des zu messenden Mediums. Zusammenfassend kann man sagen, dass mit dem Coriolis-Masse-Durchflussmesser gleichzeitig die Bestimmung von Massedurchfluss, Dichte und Temperatur möglich ist.



Bewegung der Rohre nach innen
kein Durchfluss

Bewegung der Rohre nach außen
kein Durchfluss

Richtung der Corioliskraft **bei Durchfluss** und Bewegung der Rohre nach innen

Richtung der Corioliskraft **bei Durchfluss** und Bewegung der Rohre nach außen

Bild 2-105: Vereinfachte Darstellung der Coriolis-Kraftwirkung

Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Universelles Messsystem für Durchfluss, Dichte und Temperatur, unabhängig von
  - Leitfähigkeit
  - Ein- und Auslaufstrecken
  - Strömungsprofil
  - Messstoffdichte und damit Druck und Temperatur
- Direkte Massedurchflussmessung
- Sehr hohe Messgenauigkeit (typisch ± 0,15 % v. M.)
- Multivariables Messprinzip, gleichzeitiges Messen von
  - Massedurchfluss
  - Volumendurchfluss
  - Dichte
  - Temperatur
- Keine beweglichen Teile, damit verschleißfrei

Nachteile:

- Relativ hoher Anschaffungspreis (bei einer Genauigkeit von 0,15 % v. M.)
- Einsatzgrenzen bei mehrphasigen Medien oder hohem Gasanteil.
- Ablagerungen oder Abrasion können zu Fehlern besonders in der Dichtemessung führen
- Begrenzte Materialauswahl für messstoffberührte Teile, Korrosion ist besonders zu prüfen

Doppelrohr-Messsystem

Die überwiegende Zahl der Coriolis-Geräte folgt heute im Aufbau dem Doppelrohrprinzip mit Strömungsteiler und zwei gebogenen Messrohren. Der Vorteil dieses Aufbaus, wie z. B. im FCM2000-MC2, ist seine Temperaturbeständigkeit und insbesondere die Entkopplung der Messrohrschwingung gegenüber Schwingungen von außen. Die Amplituden der Schwingung, die zur Bestimmung der Phasenverschiebung benötigt werden, misst man zwischen den Messrohren und nicht gegenüber dem Gehäuse. Eventuelle Schwingungen des Gehäuses haben so keinen Einfluss auf das Messergebnis.

Aufgrund des wesentlich stabileren und deutlicheren Signals bietet so dieses System die genauesten Messungen bei gleichzeitiger Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen. Ein gut konstruiertes Doppelrohr ist mit geringer Energie in seiner Resonanzfrequenz in Schwingung zu versetzen und zu halten und liefert so Messsignale auch bei geringsten Durchflüssen. Das Doppelrohrprinzip macht heute ca. 80 bis 90 % aller Anwendungen aus.

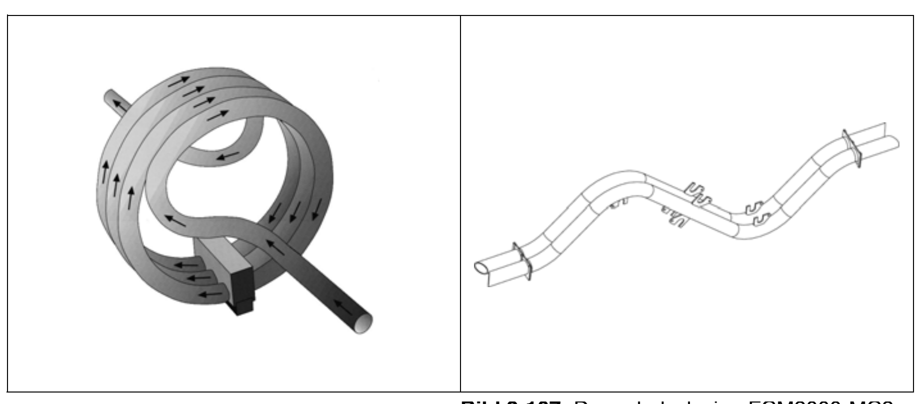


Bild 2-106: gebogenes Einrohrdesign

Bild 2-107: Doppelrohrdesign FCM2000-MC2

Einrohr - Messsystem

Neben dem Doppelrohrprinzip gibt es das Einrohrprinzip, wie z. B. beim ABB-Modell FCM2000-MS2. Um die oben genannte Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Schwingungen zu erhalten, wird dies in diesem Modell durch in Schleifen gebogene Messrohre erreicht. Die Amplituden der Schwingung, und damit die Phasenverschiebung, werden zwischen den Rohrschleifen und nicht gegen das Gehäuse gemessen. Dieses Prinzip bietet insbesondere bei kleineren Rohrdurchmessern Vorteile, da hier auf einen Strömungsteiler verzichtet werden kann.

Das **gerade Einrohrdesign** hat den Vorteil einer leichten Reinigung, eines reduzierten Druckverlustes und einer schonenden Mediumsbehandlung. Diese Vorteile werden jedoch mit einer prinzipiell geringeren Genauigkeit und einer höheren Anfälligkeit gegenüber äußeren Schwingungen erkauft. Aufgrund des geraden Messrohres muss die Schwingungsamplitude gegen das Gehäuse gemessen werden. Wenn das Gehäuse ebenfalls Schwingungen unterliegt, können diese nur schlecht kompensiert werden. Zusätzlich sind die aufgenommenen Signale wesentlich kleiner, was zu der bereits erwähnten geringeren Genauigkeit insbesondere bei der Dichtemessung führt.

Ein gerades Einrohr ist nur schwer in Schwingung zu versetzen und zu halten. Die Elastizität eines Rohres hängt direkt von der Rohrwandstärke ab. Daher müssen schwingende gerade Rohre besonders dünn konstruiert werden und sind in den verfügbaren Nennweiten eingeschränkt. Bei abrasiven oder korrosiven Medien kann die dünne Rohrwandstärke jedoch eine zusätzliche Unsicherheit bringen.

Anwendungsbereiche

Aufgrund der bereits erwähnten Vorteile des Messprinzips verwundert es nicht, dass immer mehr Industriezweige von anderen Messprinzipien auf das Coriolis-Prinzip wechseln. Insbesondere die direkte Massemessung überzeugt, da viele Rezepturen oder Prozesse auf der Masse der eingesetzten Stoffe beruhen. Frühere Abhängigkeiten von Dichteschwankungen und damit Temperatur- oder Druckänderungen gehören der Vergangenheit an. Musste früher ein Volumensignal erst in ein Massesignal umgerechnet werden, entfällt dies mit der Coriolis-Technik.

Da diese Technologie zusätzlich von Eigenschaften des Mediums wie z. B. Leitfähigkeit, Strömungsprofil, Dichte, Viskosität u. ä. unabhängig ist, können fast alle Stoffe gemessen werden: z. B. Öle und Treibstoffe, Reinigungs- und Lösungsmittel, Fette, Silikonöle, Alkohol, Methan, Fruchtlösungen, Stärke, Farben, Biozide, Essig, Ketchup, Mayonnaise, Bier, Milch, Zuckerlösungen, Gase, Flüssiggase.

Aufgrund der gleichzeitigen Erfassung der Dichte und der Temperatur des Messstoffes ist auch eine gleichzeitige Qualitätsbewertung des Mediums möglich. Weicht die Dichte des Mediums von der Sollgröße ab, lässt dies auf Qualitätsprobleme im Prozess schließen. Auch Lufteinschlüsse o. ä. lassen sich aus dem Dichtesignal ablesen.

Im Nahrungs- und Genussmittelbereich überzeugt zunächst die gute Reinigbarkeit der Geräte selbst bei einem Doppelrohrsystem, wie ABB mit seinem EHEDG-zertifizierten Aufnehmerdesign bewiesen hat. Ferner ist die hochgenaue Massemessung und die Dichtemessung der Stoffe von großem Vorteil. Zusammensetzungen können somit online überprüft werden. Aus der Dichtemessung kann mit einer speziellen Software bei zweiphasigen Medien die Konzentration berechnet werden. So ist z. B. die Zuckerkonzentration in einer Flüssigkeit als °BRIX bereits vorbelegt. Aufgrund einer variablen Eingabe von bis zu 3 Dichte-Konzentrationskurven in den Messumformer des FCM2000, kann jede Art von Konzentration gemessen werden.

In der Chemieindustrie überzeugt vor allem die sehr genaue Massemessung, das variable EEx-Konzept (EEx „e" und „i" wird nur durch die Kundenbeschaltung definiert) inkl. Isolierungen und nicht zuletzt die zusätzliche Sicherheit durch ein Druckgehäuse um die Messrohre herum. ATEX-Zulassungen bis hin zu Gruppe 1 (Zone 0) sind verfügbar. Die hohe Reproduzierbarkeit (typisch 0,1 % v. M.) ist insbesondere für Regelungs- oder Abfüllprozesse essentiell.

In der Petrochemie ist zusätzlich die Materialverträglichkeit nach NACE und Robustheit, selbst bei extremen Umweltbedingungen, wichtig. Sei es der Einsatz auf Ölfeldern bei -50 °C oder der Offshore-Einsatz mit hochkorrosivem Salzwasser. Bei letzterem bietet ABB eine spezielle Schutzlackierung für den anspruchsvollen Nordseeeinsatz an.
In der Papierindustrie sind besonders Streich- oder Farbküchen für den Einsatz von Coriolis-Masse-Durchflussmessern prädestiniert. Kam es bei schwankenden Dichte- oder Viskositätswerten immer wieder zu Problemen, so misst z. B. der FCM2000 hier äußerst stabil und hochgenau direkt die Masse. Außerdem entfallen Umrechnungen von Volumen- in Masseeinheiten.

Aufgrund der Multivariabilität, Fleixibilität, hohen Genauigkeit, Verschleißfreiheit und Robustheit erobert die Coriolis Masse-Durchflusstechnik immer mehr Märkte und Einsatzgebiete. Der zunächst hoch erscheinende Anschaffungspreis ist vor dem Hintergrund massiver Einsparungen durch genauere und einfachere Dosierung, oft vernachlässigbar. Im Gegensatz zu herkömmlichen Geräten bleibt dazu die Genauigkeit, bei geringem Wartungsaufwand, noch lange bestehen.

Häufige Fragen und Antworten

Was muss ich bei der Installation der Geräte beachten?
Die Geräte sind im Vergleich zu anderen Durchflussmessern relativ einfach zu installieren. Sie können sowohl waagrecht als auch senkrecht eingebaut werden. Abstände zu Rohrbiegungen oder Ventilen etc. müssen nicht eingehalten werden, da die Messgeräte unabhängig vom Strömungsprofil sind. Die Geräte sollten jeweils kurz vor bzw. hinter den Flanschen befestigt werden, nicht jedoch an dem Gehäuse selbst.

Wie beeinflusst ein Gas- oder Luftanteil im Medium die Messung?
Zunächst wirken Gaseinschlüsse dämpfend auf die Schwingung der Rohre, was jedoch durch einen höheren Erregerstrom ausgeglichen wird. Wenn der Gasanteil nicht zu groß ist und weitgehend homogen verteilt ist, wird die Masse-Durchflussmessung kaum beeinflusst. Die Dichtemessung jedoch kann auch hier beeinträchtigt werden. Dies erklärt sich durch das Messverfahren. Die Resonanzfrequenz der Schwingung ist proportional der momentan schwingenden Masse, bestehend aus dem Medium und den Messrohren. Unter der Voraussetzung, dass die Rohre komplett gefüllt sind, kann über die Formel

$$m = \rho \cdot V$$

die Dichte berechnet werden. Sind die Rohre nicht komplett gefüllt oder enthalten einen Luftanteil kommt es hier entsprechend zu einem Fehler.

Wie beeinflussen Feststoffanteile die Messung?
Solange die Feststoffanteile genau den Rohrschwingungen folgen und somit einen Beitrag zum Durchflusssignal liefern, ergeben sich bei der Messung keine Probleme. Entscheidend ist somit das Verhältnis zwischen Partikelgröße (Trägheit) und den viskosen Kräften (Beschleunigungskräfte). D. h., bei geringer Viskosität sollten die Feststoffpartikel möglichst klein sein. Generell sollte ein selbstentleerender Einbau vorgezogen werden, um eine Ansammlung von Partikeln insbesondere bei Mediumsstillstand in den Rohrbögen zu verhindern.

Wie beeinflusst ein zu geringer Gegendruck die Messung?
Bei zu geringem Gegendruck ist zum einen nicht sichergestellt, dass die Messrohre vollständig gefüllt sind, und zum anderen besteht die Gefahr der Kavitation, wenn der Systemdruck unter den Dampfdruck der gemessenen Flüssigkeit fällt. In vielen Fällen, in denen Probleme mit Coriolis Masse-Durchflussmessern berichtet werden, lässt sich das Problem auf einen zu geringen Gegendruck oder Gasanteile in der zu messenden Flüssigkeit zurückführen.

Was passiert, wenn die Rohrleitung nicht ganz gefüllt ist?
In diesem Fall können die Messrohre keinen stabilen Schwingungszustand erreichen und eine Messung ist nicht mehr möglich. Erkennbar wird dies zum einen durch ein instabiles, zu geringes Dichtesignal und zum anderen durch einen stark ansteigenden Treiberstrom.



Bild 2-108: Durchflussmesser FCM2000-MS2 **Bild 2-109:** Durchflussmesser FCM2000-MC2

Der Messwertaufnehmer des FCM2000 zeichnet sich durch zwei einteilig gebogene, parallel durchströmte Messrohre aus. Eine verwindungs- und biegesteife Tragstruktur, die Ein- und Auslass verbindet, ist besonders geeignet, äußere Kräfte und Momente abzufangen. Die Messrohre sind an den Ein- und Auslassenden in Strömungsteiler eingeschweißt. Somit besteht keine direkte Ankopplung an die Prozessanschlüsse. Durch diese Lösung wird der Einfluss äußerer Schwingungen auf die Messung stark minimiert.

Der Verzicht auf Schweißnähte an den mechanisch am höchsten belasteten Stellen sowie im Vakuum hartgelötete Rohr-, Erreger- und Sensorhalterungen sichern eine lange Lebensdauer. Eine ausgezeichnete Langzeitstabilität wird durch die im Vakkuum spannungsfrei geglühten Messrohre erzielt.



Bild 2-110: Durchflussmesser, zertifiziert für die Nahrungs- und Genussmittelindustrie

Das optimierte Aufnehmerdesign ermöglicht in Kombination mit dem Messrohrwerkstoff 1.4435/316L einen uneingeschränkten Einsatz in hygienischen Applikationen. Die gesamte Konstruktion aus Messrohr, Strömungsteiler und Prozessanschluss ist nach EHEDG geprüft und zertifiziert. Der CIP- bzw. SIP-Prozess kann bei Temperaturen von bis zu 180 °C durchgeführt werden.

Der Messumformer des kompakten und getrennten FCM2000 enthält einen digitalen Signalprozessor (DSP), der es ermöglicht, die Messwerterfassung für den Massestrom und die Dichtemessung mit höchster Präzision durchzuführen. Eine ausgezeichnete Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit sind das Ergebnis des neuen DSP-Messumformers. Selbstdiagnose des Messwertaufnehmers und -umformers sowie die absolute Nullpunktstabilität sind weitere Vorteile.

Technische Daten FCM2000

Messwertabweichung, Masse-Durchfluss

± 0,4 % v. Messwert ± 0,02 % von Q_{nenn}
± 0,25 % v. Messwert ± 0,02 % von Q_{nenn}
± 0,15 % v. Messwert ± 0,01 % von Q_{nenn}

Messbereich, Durchfluss

	Aufnehmer	Max. Mess-bereich [kg/min]	Max. Mess-bereich [kg/h]
MS2	„S“ DN 1,5	0... 1,08	0... 65
	„T“ DN 3	0... 4,17	0... 250
	„U“ DN 6	0... 16,7	0... 1000
MC2	„E“ DN 20	0... 100	0... 6000
	„F“ DN 25	0... 160	0... 9600
	„G“ DN 40	0... 475	0... 28500
	„H“ DN 50	0... 920	0... 55200
	„I“ DN 65	0... 1890	0...113000
	„J“ DN 80	0... 2460	0...148000
	„K“ DN100	0... 4160	0...250000
	„L“ DN150	0...11000	0...660000

Messbereich, Dichte

0,5 kg/dm^3...3,5 kg/dm^3

Messwertabweichung, Dichte

Standardkalibrierung: ± 0,005 kg/dm^3
Hochgen. Dichtekalibr. ± 0,001 kg/dm^3
Reproduzierbarkeit ± 0,0001 kg/dm^3

Prozessanschlüsse

Flansch (DIN/ANSI)
Tri-Clamp (DN 20...DN 100)
Rohrverschraubung DIN 11851
Andere Anschlüsse auf Anfrage

Nenndruck

DIN PN 16, PN 40, PN 100
ANSI 150 lb, 300 lb, 600 lb

Werkstoffe

Mediumsberührende Teile
Edelstahl 1.4571/316 Ti
Edelstahl 1.4435/316 L
Hastelloy C4 2.4610
Gehäuse: Edelstahl 1.4301

Temperaturen

Messstoff: -50...+180 °C
-20...+180 °C (ATEX und FM)
-40...+180 °C (opt. ATEX u. FM)
Umgebung: -20...+60 °C
-20...+60 °C (ATEX und FM)
-40...+60 °C (opt. ATEX u. FM)

Ex-Zulassung

II 2D T 115 °C ... T_{medium} IP 64
II 2G EEx me [ib] IIC T6 ≤ DN 40
II 1/2G EEx me [ib] IIC T6 ≥ DN 50
TÜV 99 ATEX 1443 X
FM Class I, Div. 2; Div. 1
EEx „d“
Ausgänge in Ex „e“ oder Ex „ib“

Gleichstromausgang 1/aktiv

0/4...20 mA, umschaltbar
Frei konfigurierbar über Software

Gleichstromausgang 2/passiv

4...20 mA
Frei konfigurierbar über Software

Normierter Impulsausgang

Normierter Impulsausgang max. 5 kHz, galvanisch getrennt zum Stromausgang

Schaltein-/ausgänge für:

Automatische Systemüberwachung
Vor- und Rücklaufsignalisierung
Max./Min.-Kontakt
Externe Ausgangssignalabschaltung
Externe Zählerrückstellung

Kommunikation

- HART-Protokoll
- PROFIBUS PA
- FOUNDATION Fieldbus
- RS 485 – ASCII-Protokoll
  (mit 50MM2-Messumformer)
- PROFIBUS DP
  (mit 50MM2-Messumformer)

Hilfsenergie

Großspannung 85 V...253 V
Kleinspannung 24 V AC/DC







2.2.6 Thermische Massen-Durchflussmesser für Gase

Die meisten gebräuchlichen Durchflussmessgeräte für Gase bestimmen den Betriebs-Volumenstrom. Hierbei muss durch zusätzliche Messungen von Druck und Temperatur der Massenstrom erst errechnet werden. Diese Korrekturmaßnahmen verteuern und erschweren die Messungen; außerdem verringern sie die Systemgenauigkeit des Mess-Systems. Die thermische Massenstrom-Messung für Gase liefert ohne weitere Messung oder Korrektur direkt den Massenstrom in kg/h. Mit der Normdichte des Gases errechnet sich hieraus unmittelbar der Norm-Volumenstrom z. B. in Nm^3/h.

Es haben sich zwei industrielle Verfahren der thermischen Gas-Massendurchflussmessung durchgesetzt, Heißfilm-Anemometer und kalorimetrische bzw. Kapillarverfahren.

Heißfilm-Anemometer Sensyflow

Das Messverfahren nutzt die durchflussabhängige Wärmeabgabe eines beheizten Körpers an ein Fluid. Diese strömungsabhängige Abkühlung hängt in den verfahrenstechnisch relevanten Bereichen nicht von Druck und Temperatur, sondern von Art und Anzahl der Teilchen ab, die auf die beheizte Oberfläche treffen. Das Verfahren bildet somit den Massenstrom des Fluides direkt ab.

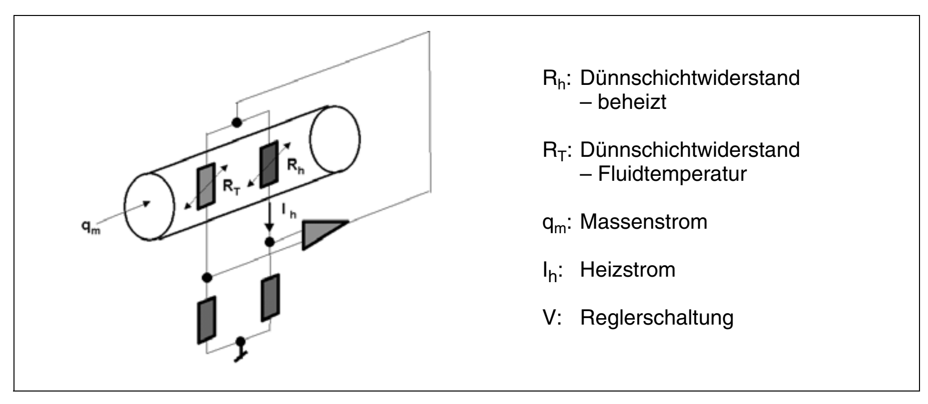


Bild 2-111: Heißfilm-Anemometer Prinzipschaltbild

Der Sensor besteht aus zwei Messwiderständen, die Teil einer elektrischen Brückenschaltung sind. Ein Messwiderstand nimmt die Temperatur des strömenden Gases an, der andere wird elektrisch beheizt und gleichzeitig durch den Massenstrom des Gases gekühlt. Eine Regelschaltung führt die zugeführte Heizleistung so nach, dass sich eine konstante Temperaturdifferenz zwischen beiden Messwiderständen einstellt. Die Leistung P stellt somit ein Maß für den Massenstrom des Gases dar. Mit den geräte- und gasabhängigen Konstanten $K_{1...3}$ kann dieser Zusammenhang durch die King'sche Gleichung dargestellt werden:

$$P = \Delta T \cdot K_1 + K_2 \cdot (qm)^{K_3}) \tag{2.36a}$$

Das Verfahren liefert den Messwert direkt in den Einheiten kg/h bzw. Norm-m^3/h, die sonst notwendige Dichtekorrektur des Messwertes entfällt. Durch die kompakte Bauform des Messfühlers wird ein minimaler Druckverlust von typisch 1 mbar erreicht. Die Ansprechgeschwindigkeit liegt bei in Dünnschichttechnik aufgebauten Fühlern im Bereich von ms (z. B. Sensyflow P und eco2). Robuste Geräte für industrielle Applikationen (Sensyflow iG und VT) erreichen immer noch schnelle Ansprechzeiten von 0,5 s. Vibrationsunempfindlichkeit und eine sehr große Messspanne bei Genauigkeiten von bis zu 1 % vom Messwert zeichnen alle Geräte gemeinsam aus.

Heißfilm-Anemometer Sensyflow iG in digitaler Technik

Bei digitalen Geräten wurde das zuvor beschriebene Messprinzip derart weiterentwickelt, dass die Gastemperatur mit ausgegeben werden kann und erheblich erweiterte Diagnosefunktionen zur Verfügung stehen. Der Messbereich konnte aufgrund der verbesserten Signalqualität auf 1:150 erweitert werden. Durch die separate Erfassung der Gastemperatur kann diese zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit von Gaskenngrößen verwendet werden. Mit den Diagnosefunktionen kann eine vorbeugende Instandhaltung durch Auswertung der Betriebszeiten, Temperaturspitzen und Systembelastungen realisiert werden.

Technische Ausführungen

Je nach Einsatzfall wurden unterschiedliche Geräte-Konzepte für Pneumatik, Prüfstände, Maschinenbau, sterile und chemische Verfahrenstechnik entwickelt. Sie unterscheiden sich in erster Linie durch den Aufbau der Sensorik, je nachdem, ob Schnelligkeit, Flexibilität oder chemische Beständigkeit gefordert werden.

Geräte für die Prozesstechnik

Robuste, universelle Geräteausführungen für Prozessapplikationen stehen mit Sensyflow VT-S und iG zur Verfügung. Alle Ausführungen werden über spezielle Rohrbauteile, die eine definierte, reproduzierbare Einbausituation gewährleisten, an den Prozess angebunden.

– Sensyflow VT-S ist ein Kompaktgerät, das direkt ein durchflusslineares 0/4…20 mA-Signal vom Sensorkopf liefert.
– Das digitale Sensyflow iG ist mit PROFIBUS DPV1 oder Analog/HART-Kommunikation erhältlich. Es kann mit bis zu 4 Kennlinien für unterschiedliche Gase oder Rohrdurchmesser geliefert werden.

Im hygienischen Bereich (Nahrungs- und Genussmittelindustrie) können Geräte der VT-CS-Serie eingesetzt werden. Spezielle Materialien und ein angepasstes Sensordesign machen die Geräte CIP- und SIP-fähig.

Typische Applikationen

- Gasmengenmessungen in Chemie und Verfahrenstechnik
- Druckluftbilanzierung
- Gasbrennersteuerungen
- Faulgas- und Belebungsluftmessungen in Kläranlagen
- Gasmessungen an Luftzerlegungsanlagen
- Wasserstoffmessungen im Prozess
- Carbonisierung in Brauereien und Softdrink-Produktionsanlagen

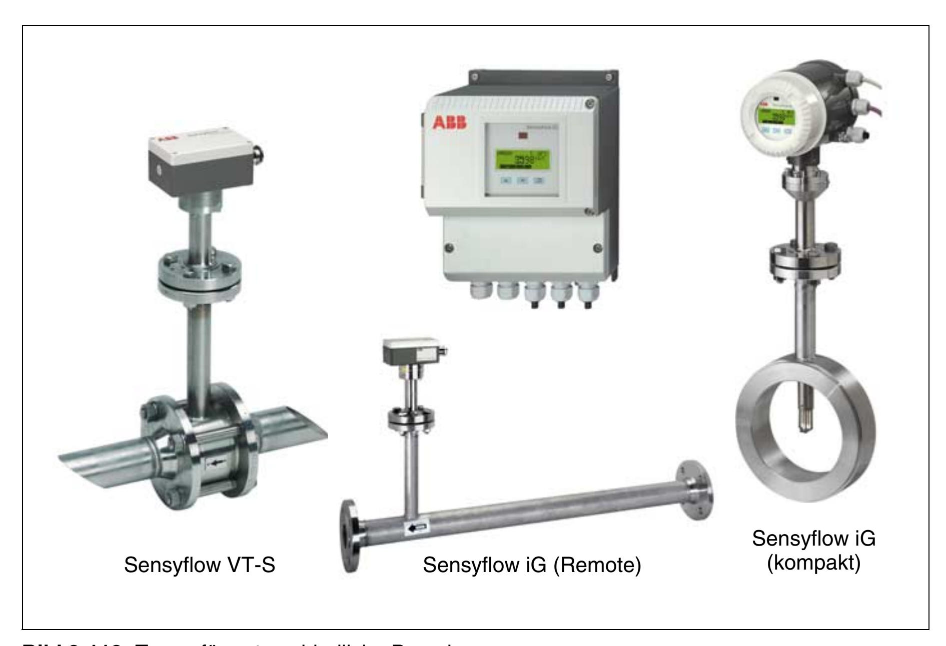


Bild 2-112: Typen für unterschiedliche Branchen

Technische Daten (Sensyflow IG und VT-Reihe):

Durchmesser:	ab DN 25, auch nicht-runde Querschnitte
Messbereich:	bis 1...150
Temperaturbereich:	-25...+300 °C
Druckbereich:	0,5...40 bar absolut
Messunsicherheit:	≤ 1 % vom Messwert
typischer Druckverlust:	1 mbar
Ansprechzeit:	0,5 s
Ausgangssignal:	0/4...20 mA; Impuls; Frequenz; Binär
Kommunikation:	HART, PROFIBUS DPV1
Hilfsenergie:	230; 110; 24 V AC; 24 V DC
Werkstoffe:	Edelstahl; Hastelloy; Keramik
Ex-Schutz:	Zone 0

Geräte für Durchfluss-Prüfstände

Bei Prüfstandsapplikationen, z. B. Ansaugluftmessungen an Verbrennungsmotoren, wird neben hoher Genauigkeit über einen weiten Messbereich, vor allem eine schnelle Ansprechgeschwindigkeit gefordert. Nur so lassen sich dynamische Vorgänge mit ausreichender Auflösung darstellen. Sensyflow P ist auf diese speziellen Anforderungen ausgelegt.



Bild 2-113: Thermischer Massendurchflussmesser für Prüfstände –Sensyflow P

Technische Daten (Sensyflow P):

Durchmesser:	DN 25…DN 200
Messbereich:	1:40
Temperaturbereich:	-25...80 °C
Druckbereich:	2,5 bar absolut
Messunsicherheit:	≤ 1% vom Messwert
typischer Druckverlust:	10 mbar
Ansprechzeit:	T_{63} ~ 12 ms
Ausgangssignal:	0/4...20 mA; 0...10 V; RS 232, ASAM-GDI
Hilfsenergie:	230/110 V AC

Druckluftregelung

An Lackierrobotern muss das Verhältnis von Lack und Zerstäuberluft zur Farbauftragsregelung mit hoher Ansprechgeschwindigkeit gemessen werden. Das hierfür konzipierte Sensyflow eco2 stellt eine kompakte Einheit mit kompletter Elektronik dar. Es ist weiter für allgemeine Druckluft-Anwendungen bis DN 25 durch sein universelles Anschlusskonzept geeignet.



Bild 2-114: Thermischer Masse-Durchflussmesser für Druckluft – Sensyflow eco 2

Technische Daten (Sensyflow eco 2):

Durchmesser:	bis DN 25
Anschlüsse:	Kleinflansch, G 3/8"...1", Legris, Transair
Messbereich:	1:100
Temperaturbereich:	0...50 °C
Druckbereich:	10 (16) bar absolut
Messunsicherheit:	≤ 3 % vom Messwert
typischer Druckverlust:	10 mbar
Ansprechzeit:	T_{63} ~ 25 ms
Ausgangssignal:	0/4...20 mA; 0...5/10 V; Impuls, digital, Frequenz, RS 232
Hilfsenergie:	24 V DC

Kalorimetrische- bzw. Kapillarverfahren

Bei sehr kleinen Rohrdurchmessern bzw. kleinsten Mengen, wie sie vor allem im Bereich der Gasanalysen und Labortechnik vorkommen, kann das kalorimeterische Verfahren angewendet werden. Das Gas durchströmt dabei eine Kapillare, die mit einer konstanten Leistung P beheizt wird.

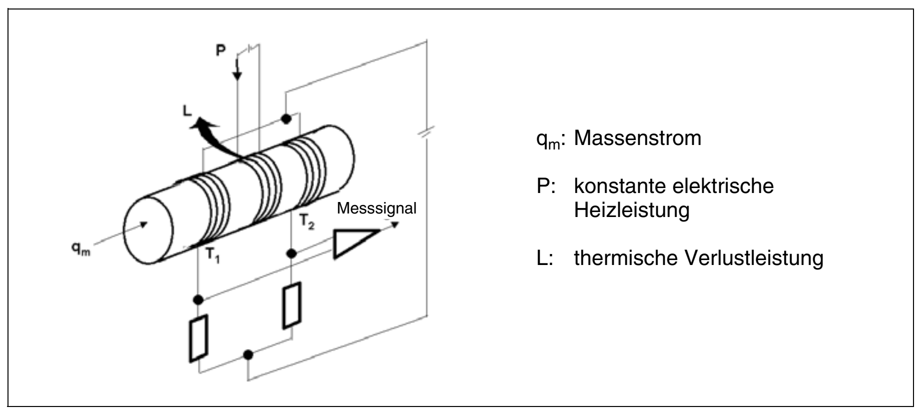


Bild 2-115: Aufheiz- bzw. Kapillarverfahren, Prinzipschaltbild

$$q_m = \frac{(P - L) \cdot C}{c_p \cdot (T_2 - T_1)}$$

Der Massenstrom kann aus der resultierenden Temperaturdifferenz, dem Wärmeverlust der Anordnung und einer Gerätekonstante C berechnet werden.

Technische Daten

Durchmesser:	bis DN 25
Messspanne:	1...50
max. zul. Temperatur:	70 °C
max. zul. Druck:	100 bar
Messwertabweichung:	< 1 % vom Messwert
Ansprechzeit:	1...5 s
Ausgangssignal:	0/4...20; 0...10 V; digital
Hilfsenergie:	24 V DC
Werkstoffe:	Aluminium, Edelstahl; Kunststoff

2.3 Durchfluss in offenen Gerinnen und Freispiegelleitungen

2.3.1 Durchflussmessung in offenen Gerinnen

Offene Gerinne gibt es besonders in der Wasser- und Abwassertechnik. Sie zeichnen sich durch ihre Außenluftbindung aus. Gleiches gilt auch für die Freispiegelleitungen, die zusätzlich in der Verfahrensindustrie zu finden sind.

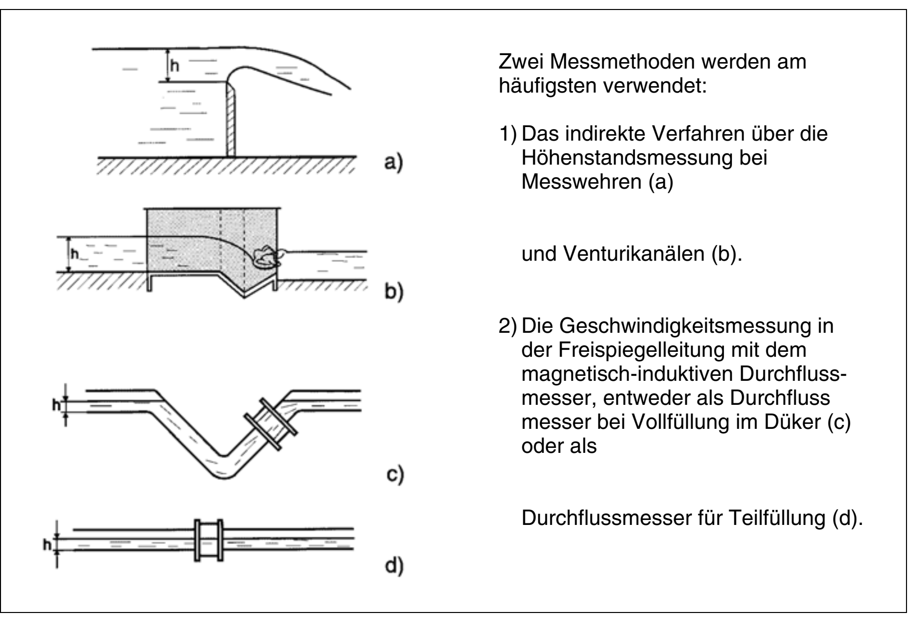


Bild 2-116: Messverfahren

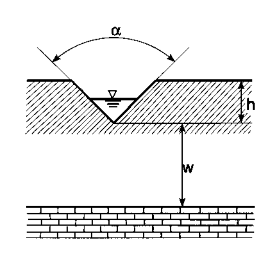
Messverfahren

Messwehre

Bei großen Wassermengen und kleinen Gefällen sind Messüberfälle geeignete Messmittel, wenn das Wasser angestaut werden kann und der Wasserstrahl vollständig belüftet ist. Belüftung bedeutet, dass Luft unter den Überfallstrahl gelangen kann, damit sich dieser ablöst und frei fällt. Messwehre sind dünnwandige Platten mit scharfer Messkante, die senkrecht zur Strömungsrichtung angeordnet sind. Je nach Aufgabenstellung weisen sie unterschiedlich gestaltete Ausschnitte auf. Für kleinere Durchflüsse wählt man das **Dreieckwehr.**

Ausgehend von der Gleichung (1.27) errechnet sich für das **Dreieckwehr**

$$q_V = \frac{8}{15} \cdot \mu \cdot \tan\frac{\alpha}{2}\sqrt{g \cdot h} \cdot h^{5/2} \qquad (2.37)$$



Der Überfallkoeffizient μ ist abhängig von der Überfallhöhe h im Verhältnis zur Wehrhöhe w.

Der Wert lässt sich mit Hilfe eines aufwendigen Rechenverfahrens bestimmen. Das Diagramm Bild 2-99 bietet die μ-Werte in Kurvenform.

Bild 2-117: Dreieckwehr nach Thomson

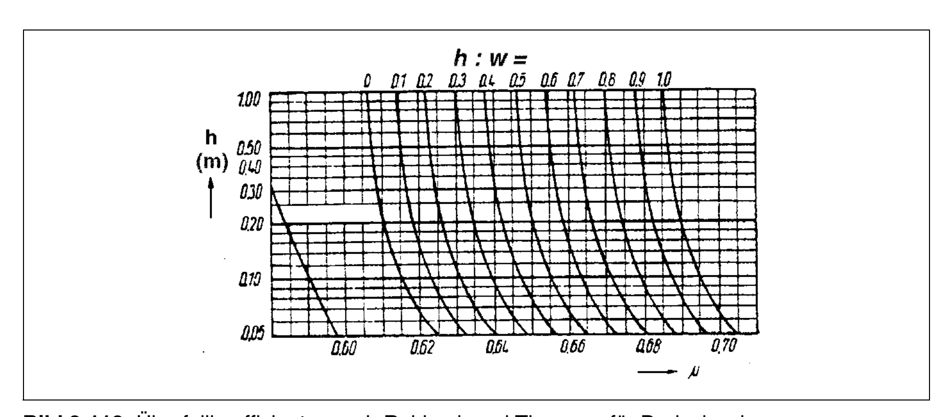


Bild 2-118: Überfallkoeffizient μ nach Rehbock und Thomson für Dreieckwehr

Dreieckwehre sind geeignet für Durchflüsse zwischen 2 und 100 l/s. Durch Parallelschaltung einer Vielzahl von Dreiecken lässt sich eine günstige geometrische Gestaltung bei höherem Durchfluss erzielen.

Die Messspanne beträgt bei guten Randbedingungen 1:100.

Für sehr große Durchflüsse verwendet man **Rechteckwehre** mit dem Nachteil einer eingeschränkten Genauigkeit im unteren Teil des Messbereiches.

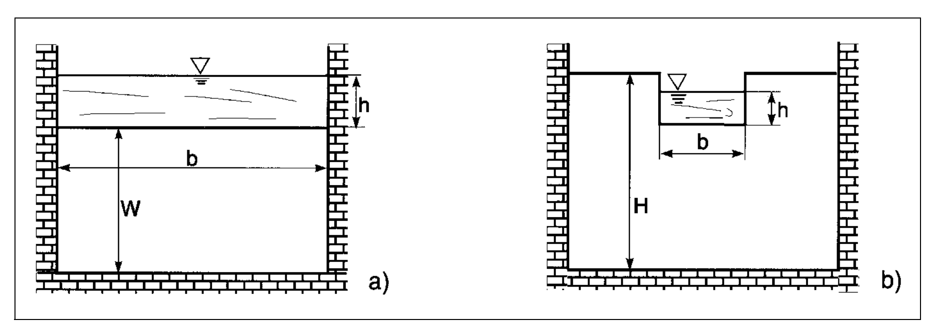


Bild 2-119: Rechteckwehr ohne (a) und mit (b) Seitenkontraktion

Berechnungsgrundlage ist Gleichung (1.27). Für Rechteckwehre ohne seitliche Einschnürung (Bild 2-119a) gilt:

$$q_v = \frac{2}{3}\mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \tag{2.38}$$

mit dem Überfallkoeffizienten μ und $h_e = h + 0{,}0011$ (m)

$$\mu = 0,602 + 0,083 \cdot \frac{h}{w}$$

für

$$w \geq 0,3 \text{ m}$$

$$\frac{h}{w} \leq 1$$

$$0,025 \leq h \leq 0,8 \text{ m}$$

Wegen der seitlichen Eingrenzung des Überfallstrahls beim Rechteckwehr ohne Seitenkontraktion kann die Luftzufuhr behindert werden. Deshalb muss die Belüftung sichergestellt sein.

Bei seitlicher Einschnürung wird die Ursprungsgleichung herangezogen

$$q_V = \frac{2}{3}\mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}$$

bei einem Koeffizienten

$$\mu = 0,6161 - \left(0,1 \cdot \frac{h}{b}\right)$$

für $0,075 \le h \le 0,6\,m$

$$b \le 2 \cdot h_{max} \le 0,3\ m$$

Die Messspanne des Rechteckwehrs liegt bei 1:20. Die Höhenstandsmessung für die Höhe h liegt bei dem genannten Wehrtypen ca. 4 x h vor dem Wehr. Die Wassergeschwindigkeit sollte vor dem Wehr nicht größer sein als 6 cm/s. Und natürlich muss das Wasserniveau hinter der Wehrplatte einen Überfall zulassen; deshalb sollten mindestens 5 cm Abstand zwischen Öffnungsunterkante und Wasserniveau eingehalten werden.

Venturi-Kanalmesser

Zur Durchflussmessung mit Messwehren muss das Wasser angestaut werden, was unter Umständen im Zulaufbereich Veränderungen verursacht. Diese Bedingung wird beim Venturikanal nicht gestellt.

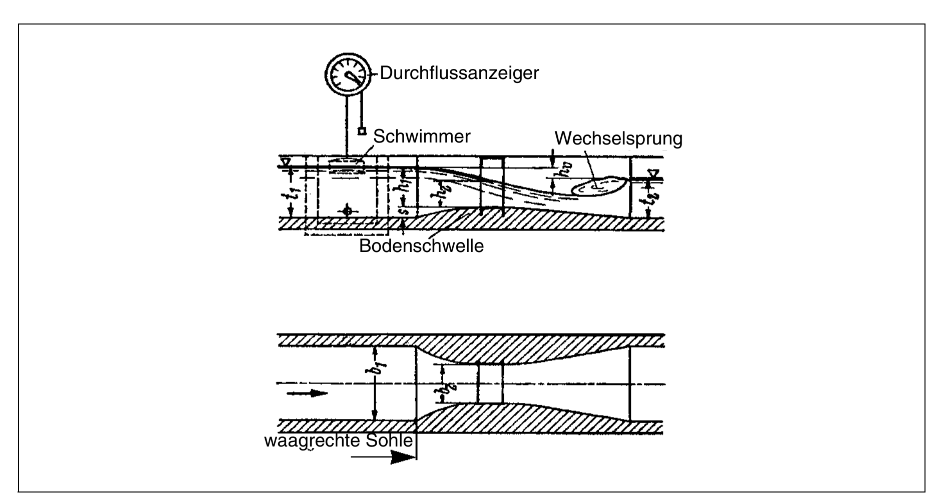


Bild 2-120: Venturi-Kanal

Er kann deshalb schon bei kleinsten Durchflüssen reagieren. Wie bei der Venturidüse bewirkt eine Einschnürung des Abflussquerschnitts eine Wandlung der Energieformen, die zur Beschleunigung im Bereich der Einschnürung führt. Die Einschnürungen sind in der Regel seitlich; es gibt sie aber auch als Bodenschwelle.

Die Berechnung des rechteckigen Venturikanals geschieht wieder mit der Gleichung (1.27) nämlich:

$$q_v = \frac{2}{3}\mu \cdot b_2 \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}$$

Der Wasserspiegel vor dem Kanaleinlauf (Oberwasser) ist beruhigt, das Wasser befindet sich im Zustand des Strömens. Dieser stellt sich automatisch ein: Wasser wird angestaut, die mittlere Fließgeschwindigkeit v sinkt, die Flüssigkeit geht in den strömenden Zustand über.

Die Beschleunigung in der Einschnürung muss das Wasser zum Schießen bringen, damit Strömungsstörungen aus dem Unterwasserbereich keinen Einfluss auf den Wasserspiegel vor der Engstelle ausüben können. Nur durch diese Maßnahme kann eine eindeutige Abhängigkeit zwischen Oberwasserhöhe und Durchfluss gesichert werden. Danach, nämlich im Bereich der Kanalerweiterung, wird wieder der Zustand des Strömens erreicht, gekennzeichnet durch den Wechselsprung mit Deckwalze. Ein Rückstrom muss vermieden werden, denn er beeinträchtigt die Funktion der Messeinrichtung.

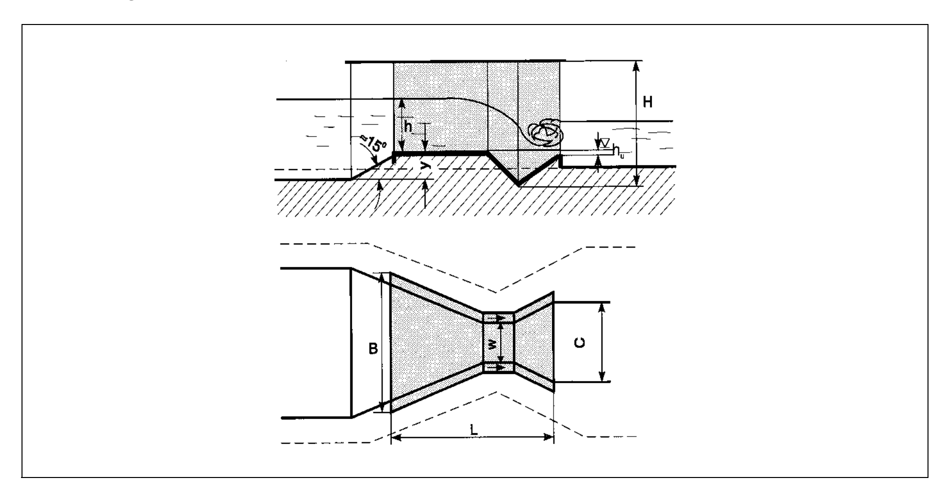


Bild 2-121: Venturi-Kanal nach Parshall

Venturikanal nach Parshall

Der von **ABB** eingesetzte Venturikanal ist eine Konstruktion von Parshall mit der Besonderheit, dass zusätzlich zur seitlichen Einschnürung ein Sturz im Boden die Strömungsübergänge Strömen-Schießen und Schießen-Strömen garantiert. Als fertiges Bauteil aus glasfaserverstärktem Polyesterharz ist der Kanal in festgelegten Größen verfügbar. Der Anwender hat die leichte Aufgabe des Einsetzens in das vorhandene Gerinne.

Wegen der Form des Venturikanals Parshall ändert sich in der Gleichung (1.27) der Exponent von h geringfügig, so dass die vereinfachte Gleichung jetzt lautet:

$$q_V = k \cdot h^n \tag{2.39}$$

Bei der geometrischen Auslegung und Bestimmung der Messbereiche hat man die dimensionsabhängigen Größen k und n entsprechend berücksichtigt, so dass fest vorgegebene Messbereiche eine rechnerische Nachkontrolle erübrigen.

Typ	Einschnürungen [mm]	Durchfluss max., [m³/h]	Stauhöhe max., [mm]	Abmessungen [mm]		
				Länge L	Höhe H	Breite B
W 45	45	50	260	480	450	280
W 75	75	190	457	915	667	390
W 150	150	395	457	1524	724	527
W 225	225	900	609	1625	875	705
W 300	300	1640	762	2867	1143	974
W 450	450	2510	762	2943	1143	1155
W 600	600	3380	762	3020	1143	1336
W 900	900	5140	762	3170	1143	1701
W 1200	1200	6920	762	3318	1143	2067
W 1500	1500	8730	762	3464	1154	2432
W 1800	1800	10550	762	3617	1154	2797
W 2100	2100	12374	762	3765	1154	3162
W 2400	2400	13990	762	3915	1154	3514

Tab. 2-8: Messbereiche und Maße der Parshall-Venturi-Kanäle

Bei der Auswahl der Messstelle sollte man einen Ort wählen, der innerhalb einer Strecke mit konstantem Querschnitt und konstantem Gefälle liegt, wobei für das Gefälle ein Wert zwischen 2 ‰ und 1 ‰ günstig ist. Die störungsfreie Beruhigungsstrecke vor dem Venturikanal sei das 10- bis 20-fache der Kanalbreite B (mindestens 2 m), die Nachlaufstrecke 10 x B (mindestens 1 m). Der Abtastpunkt für den Höhenstand h liegt ca. 3 x h vor dem Kanalbeginn. Der Rückstau vom Unterwasser ist beim Parshall-Kanal begrenzt zugelassen, wobei das Verhältnis Unterwasserhöhe h_u zu Oberwasserhöhe h zwischen 0,6 und 0,7, je nach Größe des V-Kanals, betragen darf.

Messwertaufnehmer für Gerinne-Durchflussmesser

Nachdem durch Messwehre oder Venturikanäle Einrichtungen geschaffen wurden, die eindeutige physikalische Zusammenhänge für erfassbare Größen liefern, fehlen noch die Organe, die das Flüssigkeitsniveau erfassen und in durchflussproportionale Werte umwandeln. Die Oberwassertiefe h kann direkt oder indirekt gemessen werden.

Zur direkten Messung dient
die Schwimmermessung,

zur indirekten Messung
das hydrostatische Verfahren mit Druckaufnehmern,
die berührungslose Wasserstandsmessung mit Echolot,
die hydrostatische Druckmessung mittels Einperlmethode.

Schwimmermessung

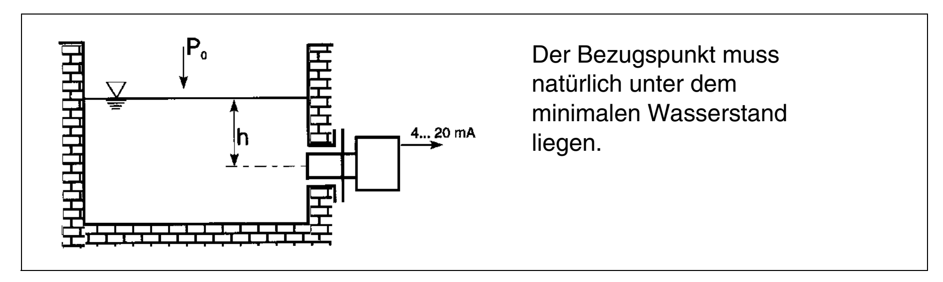
Der Wasserspiegel wird mit einem Schwimmerkörper abgetastet, dessen Stellung mechanisch übertragen, auf einer nichtlinearen Skala angezeigt oder elektrisch linearisiert in ein Einheitssignal umgewandelt wird. Verschmutzung, Bewuchs, mechanischer Verschleiß und Frost belasten den Schwimmer und die Übertragungsorgane, sie beeinflussen das Strömungsprofil und sind daher für Fehler verantwortlich. Eventuell muss der Schwimmer in einer eigenen Schwimmerkammer untergebracht werden. Dazu kommt ein erhöhter Wartungsaufwand.

Das sind Gründe dafür, dass die Schwimmermessung an dieser Stelle nur selten gebraucht wird.

Hydrostatische Druckmessung

Der **hydrostatische Druck** ist die von einer Flüssigkeitssäule auf einen Bezugspunkt ausgeübte Kraft. Der gemessene Druck ist der Höhe proportional.

$$p = h \cdot \rho \cdot g + p_0 \qquad (2.40)$$



Der Bezugspunkt muss natürlich unter dem minimalen Wasserstand liegen.

Bild 2-122: Druckmessung

Beim Venturikanal könnte man die Messstelle in die Kanalsohle integrieren. Bild 2-122 zeigt den seitlichen Anbau eines speziell für dieses Messverfahren konstruierten elektrischen Messumformer.

Der Messumformer (Bild 2-123) besitzt einen Tubus mit einer Membrane, die mit der Kanalwand bündig abschließt. Über eine Ölhydraulik wirkt der Membrandruck auf eine kapazitiv arbeitende Messzelle, mit deren Hilfe das Ausgangssignal 0/4...20 mA erzeugt wird.

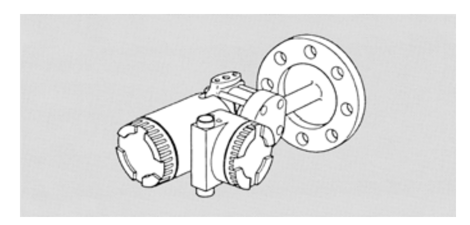


Bild 2-123: Elektrischer Messumformer für Flüssigkeitsstand Type DHE

Die Messzelle arbeitet als Differenzdruckmesser in der Weise, dass die Minus-Seite dem Atmosphärendruck p_o ausgesetzt ist. Somit wirkt dieser Vordruck p_o auf beiden Seiten der Messzelle und eliminiert sich damit selbsttätig. Die Nullpunkteinstellung kann bei seitlichem Anbau des Messumformers den Messbereichsanfang auf die Kanalsohle beziehen. Selbstverständlich kann dieses Gerät über Schnittstelle oder Feldbusankopplung mit modernen Leitsystemen kommunizieren. Der Messbereich liegt zwischen 32...3200 mbar und 5...50 bar.

Die an der Kanalinnenwand abschließende Membrane ist unempfindlich gegen Ablagerungen und Verschmutzungen.

Einperlmethode

Durch ein Tauchrohr oder ein seitlich bzw. von unten eingeführtes Rohr wird Luft oder ein Schutzgas in das Gerinne hineingedrückt; die Luft steigt perlend nach oben, daher die Bezeichnung Einperlmethode.

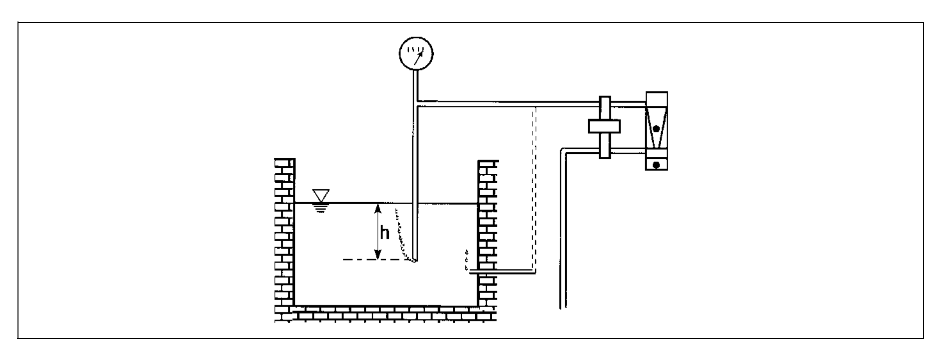


Bild 2-124: Einperlmethode

Zur Dosierung des Gases verwendet man einen Kleindurchflussmesser Type 10A6100 mit Nadelventil und Differenzdruckregler. Hinter dem als Drossel wirkenden Regler stellt sich im Rohr ein Druck ein, der gleich dem hydrostatischen Druck am Rohrende ist. Das Nadelventil dient der Einstellung des Perlgas-Durchflusses; der Regler sorgt für konstanten Durchfluss. Druckmesser oder Druckmessumformer verarbeiten den höhenstandsproportionalen Druck.

Die Einperlmethode hat den Vorteil, dass empfindliche Messorgane mit der Flüssigkeit nicht in Berührung kommen und daher weder chemisch noch mechanisch angegriffen werden können. Außerdem ist der Schutzaufwand bei Explosionsgefahr sehr gering.

Echolot

Die erfolgreichste Methode der berührungslosen Wasserstandsmessung ist das Echolotprinzip. Hierbei wird von einem über dem Wasserspiegel angeordneten Schallsender ein Ultraschallsignal ausgesandt, das nach Reflexion an der Wasseroberfläche wieder empfangen wird. Aus der Laufzeit ergibt sich der Abstand zwischen Sender/ Empfänger und Wasseroberfläche und damit die gesuchte Oberwassertiefe. Die Schallgeschwindigkeit ist abhängig von der Beschaffenheit der durchschallten Laufstrecke, in der sich beispielsweise Temperatur und Feuchtigkeit ändern. Mit Hilfe einer Referenzstrecke, die mechanisch genau definiert ist, lassen sich derartige Störeinflüsse kompensieren.

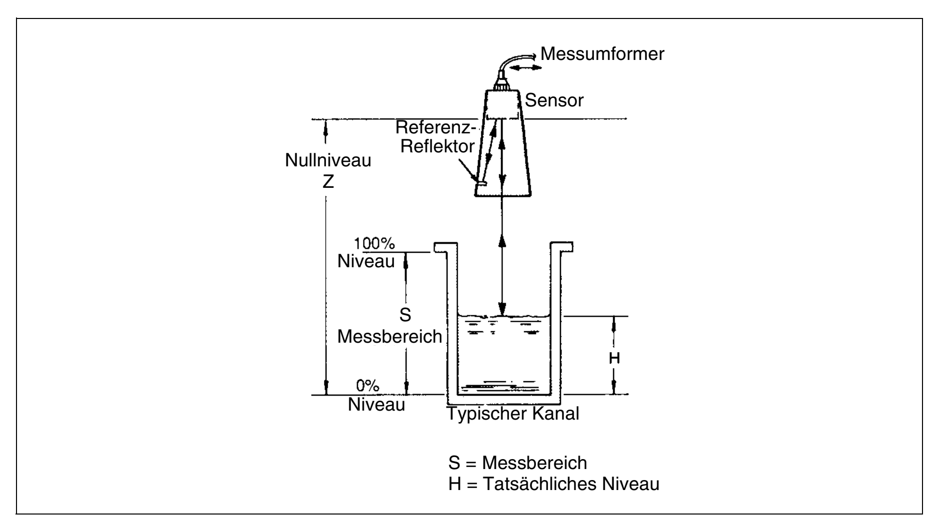


Bild 2-125: Echolotprinzip

Zur Abschirmung gegen äußere Einflüsse, z. B. Schneefall, und zum Schutz gegen unerwünschte Wandreflexionen dient ein Trichter am Sensor.

Der nachgeschaltete Messumformer (Typenbezeichnung 50US3100) beinhaltet einen Rechner, der die unterschiedlichen Kurvenformen verschiedener Gerinnemesser ein-

rechnet und dann ein durchflussproportionales Ausgangssignal 0/4...20 mA liefert. Natürlich haben derartige Messumformer Selbstübewachungsfunktionen, Grenzkontakte und Volumenzähler.

2.3.2 Durchflussmessung in Freispiegelleitungen

Es gibt Systeme geschlossener Rohrleitungen, die nicht ständig mit Flüssigkeit voll- sondern teilgefüllt sind, die aber so dimensioniert sein müssen, dass sie sporadisch große Mengen aufnehmen können. Das markanteste Beispiel ist die Abwasserleitung, in der nachts wenig, am Tage mehr, bei einem Gewitter aber extrem viel Wasser fließt. Gefordert wird ein Durchflussmessgerät, das bei allen Betriebszuständen genaue Messwerte liefert.

Das mit Feststoffen beladene Abwasser gestattet keine Einbauten im Rohr. Deshalb ist das ideale Messgerät der magnetisch-induktive Durchflussmesser. Mit einem kleinen Schönheitsfehler: Die eigentliche Messgröße ist die Fließgeschwindigkeit v. Erst durch die Multiplikation mit der konstanten Größe – gefüllter Rohrquerschnitt A – ergibt sich der gesuchte Durchfluss $q_v = v \cdot A$. Da A, wie oben beschrieben, sich ständig ändert, gibt es zwei Möglichkeiten für die Messung: Entweder wird die Rohrleitung so ausgebildet, dass an der Messstelle eine Vollfüllung sichergestellt ist, oder es wird der speziell für diesen Einsatz konstruierte magnetisch-induktive Durchflussmesser Parti-MAG verwendet.

Magnetisch-induktive Durchflussmesser im Düker

Mit Hilfe eines Dükers (Bild 2-126) wird die Vollfüllung der Rohrleitung garantiert und damit eine eindeutige Messung. Ein Argument gegen die Dükerung ist die Furcht vor Ablagerungen gerade bei Abwasser.

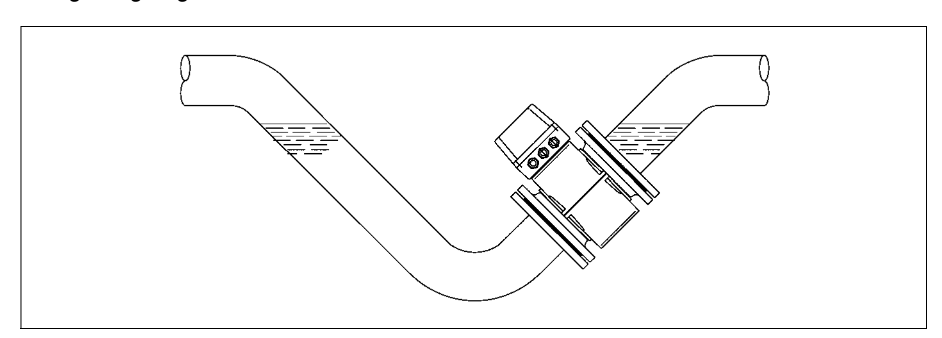


Bild 2-126: Magnetisch-induktiver Durchflussmesser im Düker

Daher wird die Schleppkraft des Wassers häufig unterschätzt, die natürlich mit der Größe des Durchflusses wächst. Eventuelle Ablagerungen werden also bei Volllastbetrieb aus dem Düker herausgespült, den man auch dadurch provozieren kann, dass das Wasser kurzzeitig vor dem Düker aufgestaut wird. Eine andere Möglichkeit ist eine eigene zusätzliche Spülwasserleitung.

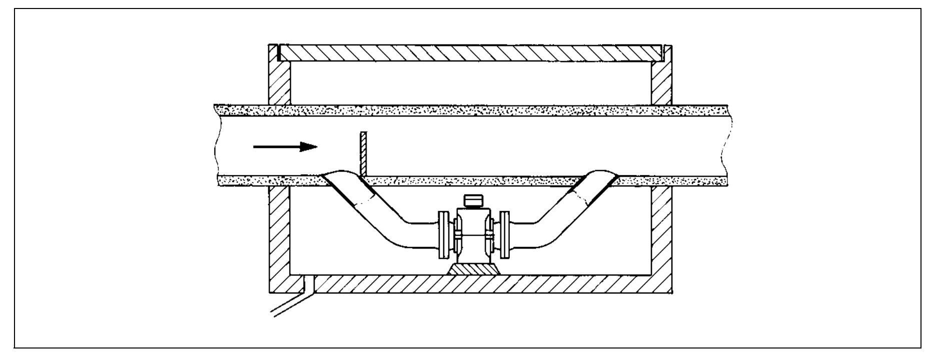


Bild 2-127: Düker mit Hochwasserleitung

Höhere Fließgeschwindigkeiten im Düker verhindern Ablagerungen. Die Rohrleitung bekommt also einen so kleinen Querschnitt, dass sie bei Hochwasser – etwa durch Gewitter – unterdimensioniert ist.

Eine Lösung dieses Problems ist die große Rohrleitung (Bild 2-119) mit einem Wehr und dem Düker mit dem Nachteil, dass während des Hochwassers nicht der gesamte Durchfluss erfasst wird. Gegenüber dem magnetisch-induktiven Durchflussmesser **PARTI-MAG II** für teilgefüllte Rohrleitungen hat das System der Dükerung den Vorteil, dass es das genauere Messgerät verwendet. Der Kostenvorteil durch das kleinere Gerät wird meistens durch die teueren Baumaßnahmen angeglichen.

Magnetisch-induktiver Durchflussmesser PARTI-MAG II für teilgefüllte Rohrleitungen

Von den unter Kapitel 2.2.3 beschriebenen magnetisch-induktiven Durchflussmessern ist bekannt, dass er ein der Fließgeschwindigkeit v proportionales Signal erzeugt und dass sich der Durchfluss q_v aus dem Produkt mit dem Querschnitt A als unveränderliche Größe ergibt. Das Gerät benötigt also in der Messzone einen flüssigkeitsgefüllten Querschnitt. In der Freispiegelleitung ist diese Voraussetzung nicht gegeben. Deshalb kann ein magnetisch-induktiver Durchflussmesser an dieser Stelle nur dann richtig messen, wenn der Füllgrad in die Messwertbildung eingeht. Und das ist der Grundgedanke für die Konstruktion des **PARTI-MAG II**.

Für die Berechnung von zwei unbekannten Größen benötigt man nach den Gesetzen der Algebra zwei voneinander unabhängige Aussagen oder hier zwei Messwerte.

Diese werden beim PARTI-MAG II messtechnisch wie folgt ermittelt:

Der zu messende Volumenstrom durchfließt ein isolierend ausgekleidetes Rohr. Mit Hilfe der an der Rohrsohle und am Rohrscheitel außen angebrachten Spulen wird im Rohrquerschnitt ein Magnetfeld erzeugt (Bild 2-128).

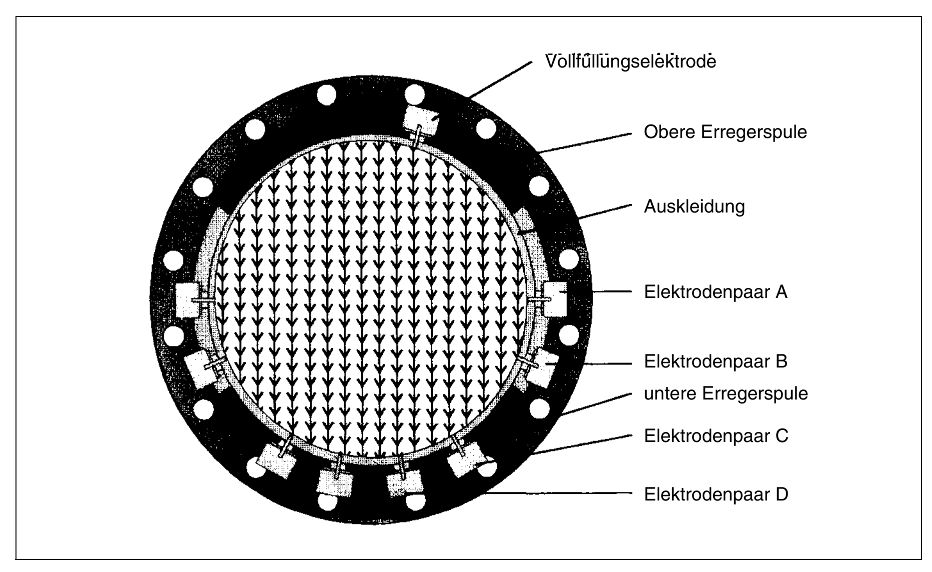


Bild 2-128: Aufbau des Messwertaufnehmers

Wie im Bild 2-128 gezeigt, besitzt der Messwertaufnehmer des PARTI-MAG II vier Elektrodenpaare, die in unterschiedlichen „Höhen“ angebracht sind. Zur Detektion der in der Flüssigkeit induzierten Spannung wird, je nach Füllhöhe, das optimal platzierte Elektrodenpaar A, B oder C herangezogen. Somit können Durchflüsse bis zu einer Füllhöhe von 10 % der Höhe bei Vollfüllung erfasst werden. Dieses entspricht einer Fläche von 5 % des Gesamtquerschnittes.

Im Messrohr sind quer zur Fließrichtung und auch quer zu den Feldlinien Messelektroden angeordnet. Mit Hilfe dieser Elektroden wird die in der Flüssigkeit induzierte Spannung detektiert. Bei voll gefüllter Rohrleitung ist diese Spannung, wie beim herkömmlichen MID, ein „direktes Maß“ für die mittlere Fließgeschwindigkeit.

Bei teilgefüllter Rohrleitung hingegen ist die Spannung, die an den Elektroden detektiert wird, mit einem Faktor zu korrigieren. Er wird aus einer im Messumformer hinterlegten Kurve ermittelt.

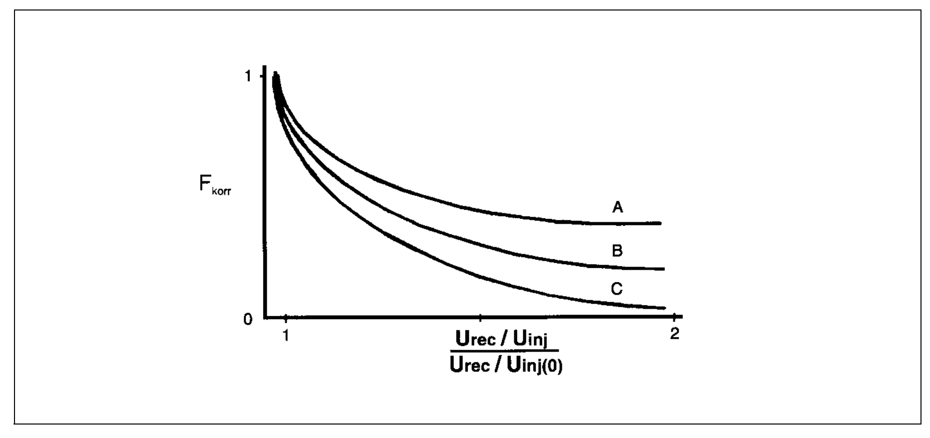


Bild 2-129: Korrekturkurve für detektierte fließgeschwindigkeitsproportionale Spannung an Elektrodenpaar A, B, C

Diese Korrekturkurve kann wie in Bild 2-129 skizziert, in Abhängigkeit des Verhältnisses zweier Spannungen U_{rec}/ U_{inj} dargestellt werden.

Mit dem magnetisch-induktiven Durchflussmesser PARTI-MAG II wurde ein Gerät konstruiert, das die Vorteile der vorher beschriebenen Systeme vereint und die Nachteile bei Teilfüllung verhindert. Es verursacht keine zusätzlichen Druckverluste, vermeidet kostspielige Bauwerke und erfasst kleinste Durchflüsse bei niedrigem Niveau und kleiner Fließgeschwindigkeit oder große Durchflüsse bei Vollfüllung und hoher Geschwindigkeit.

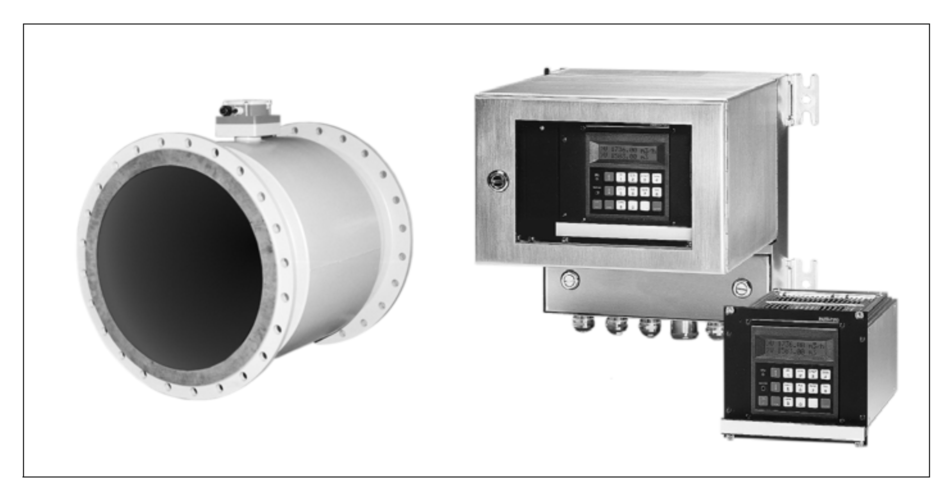


Bild 2-130: Aufnehmer und Messumformer des PARTI-MAG II

Die Qualität der Messung hängt von der Geschwindigkeitsverteilung im gefüllten Querschnitt ab. Die Messgenauigkeit bei Vollfüllung beträgt 1 % vom Messwert; bei Teilfüllung wird eine Messgenauigkeit von 3 bzw. 5 % vom Messwert bis zu einer Minimalfüllung von 10 % DN erreicht.

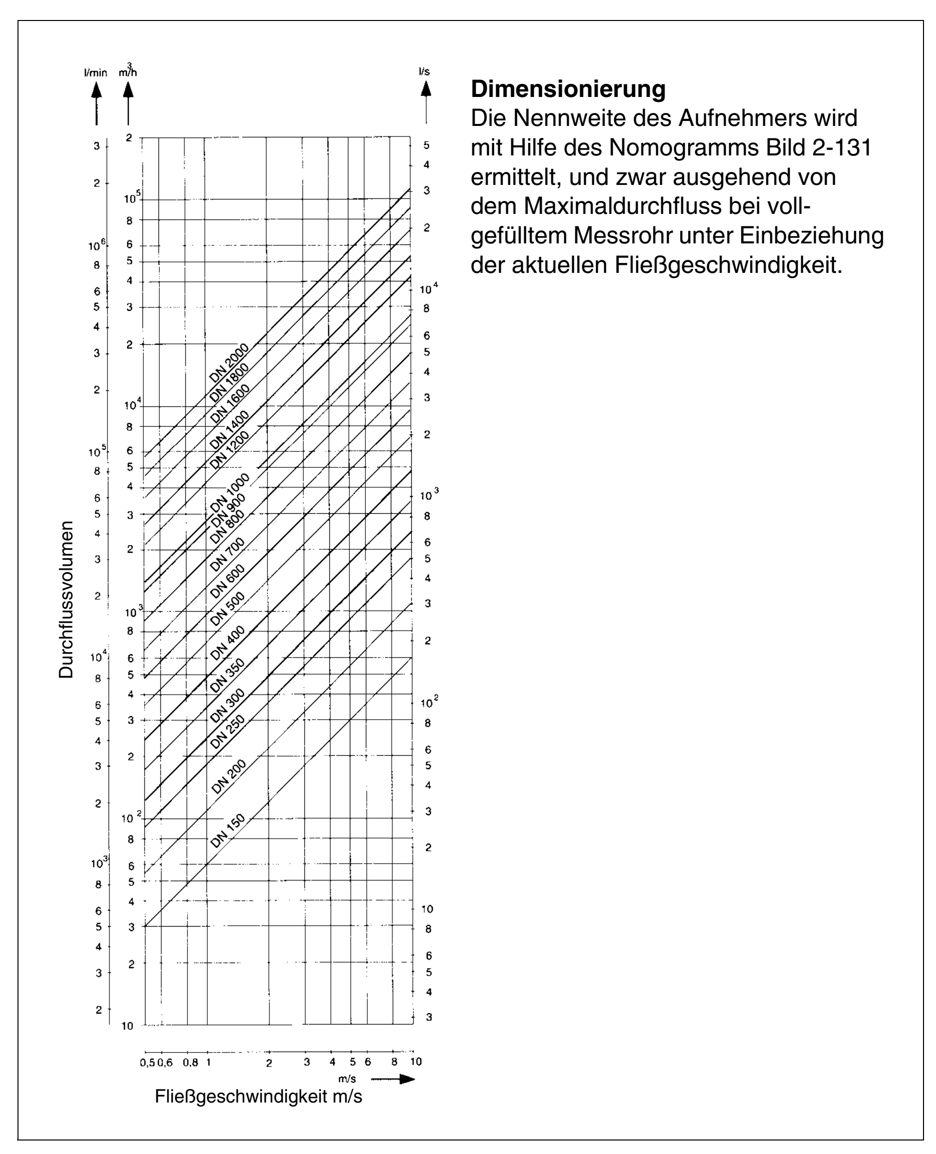


Bild 2-131: Nennweitenabhängige Durchflusswerte

Ein Sonderfall ist die Dimensionierung von Wasser-, Abwasserleitungen in einer Gefällestrecke. Hier wird die Fließgeschwindigkeit durch die Rohrreibung und das Gefälle bestimmt. Deshalb kann die Geschwindigkeit mit Hilfe des Widerstandsbeiwertes berechnet werden. Nach **Nikuradse** gilt für das Rohr mit rauer Wand bei turbulenter Strömung

$$v = \sqrt{\frac{h_v}{l} \cdot \frac{2g \cdot d}{\lambda}} \tag{2.42}$$

mit dem Rohrdurchmesser d in mm und der Rauheit k in mm. Für Stahl- bzw. Gusseisenrohre setzt man bei dieser Überschlagsrechnung für k den Wert 1 mm an. Zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit wird die **Darcy-Weisbach-Gleichung** zugrunde gelegt und umgewandelt zu:

$$\lambda = \frac{1}{\left(2\,\lg\frac{d}{k} + 1,14\right)^2} \tag{2.41}$$

mit dem Quotienten h_v/l für das Gefälle. Der für das volle Rohr bestimmte Wert v ermöglicht mit dem Nomogramm (Bild 2-116) die Kontrolle des Durchflusses. Wie bereits erwähnt ist die Messgenauigkeit davon abhängig, dass die Strömung gleichförmig verläuft, und zwar besonders bei Teilfüllung.

Diese Bedingung kann in einer langen Leitung mit gleich bleibender Rauheit nur dann erfüllt werden, wenn Abflussstörer wie Profiländerungen der Leitung, Vorsprünge oder Anschlüsse in der Rohrwandung, Ablagerungen und andere Wellen und Wirbel erzeugende Einflüsse ausreichende Abstände von der Messstelle haben. Im Idealfall spricht man vom Normalabfluss. Diese Tatsache ist der Grund für die Empfehlung von Beruhigungsstrecken von 5 x DN vor bzw. 3 x DN hinter der Messstelle.

Technische Daten:

Modell:	MAG-XP
Magnetfelderregung:	geschaltetes Gleichfeld
Signalabgriff:	galvanisch
Mindestleitfähigkeit:	50 µS/cm

Größen

Auskleidungswerkstoffe	Elektrodenwerkstoffe
Hart-, Weichgummi	Niro 1.4571 Hastelloy C oder B
PTFE/PFA	Hastelloy C Hastelloy B, Ti, Ta, Pt-Ir

Elektrodenwerkstoffe

Auskleidungswerkstoffe	DN	PN
Hartgummi	150...2000	6...40
Weichgummi	150...2000	6...40
PTFE	150... 800	10...40
PFA	150... 250	10...40

Technische Daten:

Prozessanschluss	Flansche
Ex-Schutz	Zone 1
Messbereichsendwert	0,5...10 m/s
Max. Messwertabweichung	Vollfüllung: 1 % vom Messwert Teilfüllung: 3 bzw. 5 % vom Messwert
Ausgang	0/4...20 mA, Bürde < 1000 Ω 0/2...10 mA, Bürde < 2000 Ω
Impulsausgang	Aktiv 24 V DC Passiv (Optokoppler) 5...25 V, 5...200 mA
Schnittstelle	RS 232, RS 485
Hilfsenergie	24 V, 115 V, 230 V, 50/60 Hz

3 Vorschriften und Forderungen zur Qualität und Sicherheit

3.1 Qualitätsmanagement

Um ein Unternehmen finanziell lebensfähig zu gestalten, muss es sich marktgerecht verhalten. Deshalb ist das oberste Ziel, die Erwartungen der Kunden zu erfüllen. Von den Produkten erwartet man optimale Funktionalität und lange Lebensdauer bei günstigen Preisen und kurzer Lieferzeit. Die Produkthaftung verpflichtet zu einer Fertigung unter Beachtung der Sicherheitsforderungen und der Einhaltung der geltenden Normen, Vorschriften und den anerkannten Regeln der Technik.

In jedem Unternehmen gab und gibt es Organisationsformen und Ablaufsysteme, mit deren Hilfe die genannten Aufgaben gelöst werden. Mit der nach 1983 erarbeiteten Normenreihe DIN EN ISO 9000 ff zur Darlegung von Qualitätsmanagementsystemen wurde eine Basis geschaffen, die eine internationale Vergleichbarkeit ermöglicht und die eine ständige Überprüfung durch unabhängige Institute verlangt.

ABB Automation Products GmbH, Werk Göttingen, verfügt über die Zertifizierung gemäß der Norm DIN EN ISO 9001 seit 1993. Durch TÜV Cert wurde die Gültigkeit und die Anwendung dieser Norm von der Produktentwicklung, der Produktion, dem Vertrieb bis hin zum Service jährlich durch Audits bestätigt. Das für jedermann zur Verfügung stehende Qualitätsmanagement-Handbuch unseres Hauses (kurz QMH) beschreibt die Ziele, die Zuständigkeiten, die Geltungsbereiche und die Vorgehensweise innerhalb des Hauses ABB Automation Products GmbH, Werk Göttingen. Für alle Bereiche gibt es Anweisungen und Beschreibungen, welche die Zusammenarbeit festlegen, um so einen reibungslosen Ablauf von der Idee eines Produkts bis hin zur Auslieferung an den Kunden festlegen.

Für unsere Kunden und Geschäftspartner bedeutet das Zertifikat nach DIN EN ISO 9001 eine hohe Qualität unserer Produkte. Unter Qualität verstehen wir nicht nur die anforderungsgerechte Beschaffenheit unserer Produkte und Dienstleistungen und deren termingerechte Lieferung, sondern auch die gute Zusammenarbeit zwischen unseren Kunden und allen Mitarbeitern.

Dieses wird unter anderem auch dadurch bestätigt, dass wir als Lieferant gemäß der Regel KTA 1401 die Eignung zur system- und produktbezogenen **Qualitätssicherung** für die Planung und Fertigung von Durchflussmessgeräten für kerntechnische Anlagen durch die VBG-Arbeitsgemeinschaft zugesprochen bekommen haben.

Der TÜV-CERT bescheinigt **ABB Automation Products** die Qualitätssicherung nach DIN ISO 9001.


TÜV CERT

ZERTIFIKAT

Die TÜV CERT-Zertifizierungsstelle der TÜV NORD
Zertifizierungs- und Umweltgutachter Gesellschaft mbH
bescheinigt gemäß
TÜV CERT-Verfahren, dass das Unternehmen

ABB Automation Products GmbH
D - 37079 Göttingen

für den Geltungsbereich

Instrumententechnik in Vertrieb,
Produktion, Entwicklung und Verwaltung

ein Qualitätsmanagementsystem eingeführt hat und anwendet.

Durch ein Audit, Bericht-Nr. 937142-03
wurde der Nachweis erbracht, dass die Forderungen der

DIN EN ISO 9001 : 1994

erfüllt sind.

Dieses Zertifikat ist gültig bis **Dezember 2001**
Zertifikat-Registrier-Nr. **QA 413**

Hannover, den 7. März 2000

TÜV NORD

ZERTIFIZIERUNGS- UND UMWELTGUTACHTER GESELLSCHAFT


TÜV CERT

CERTIFICATE

The TÜV CERT Certification Body of TÜV NORD
Zertifizierungs- und Umweltgutachter Gesellschaft mbH
certifies in accordance with TÜV CERT
procedures that

ABB Automation Products GmbH
D - 37079 Göttingen

has established and applies a quality system for

Instrumentation in Sales, Production,
Development and Administration.

An audit was performed, Report No. 937142-03

Proof has been furnished that the requirements according to

DIN EN ISO 9001 : 1994

are fulfilled.

The certificate is valid until **December 2001**
Certificate Registration No. **QA 413**

Hanover, March 7, 2000

TÜV NORD

ZERTIFIZIERUNGS- UND UMWELTGUTACHTER GESELLSCHAFT

3.2 Schutzarten nach EN 60529 (Auszüge aus dem Normblatt)

Die Norm EN 60529 klassifiziert den Schutz von elektrischen Betriebsmitteln durch Gehäuse, Abdeckungen oder dergleichen. Sie legt **Schutzarten** mit Schutzgraden fest.

Die Norm EN 60529 umfasst:

a) Schutz von Personen gegen Berühren von betriebsmäßig unter Spannung stehenden Teilen oder gegen Annähern an solche Teile sowie gegen Berühren sich bewegender Teile innerhalb von Betriebsmitteln (Gehäusen) und Schutz der Betriebsmittel gegen Eindringen von festen Fremdkörpern (Berührungs- und Fremdkörperschutz).

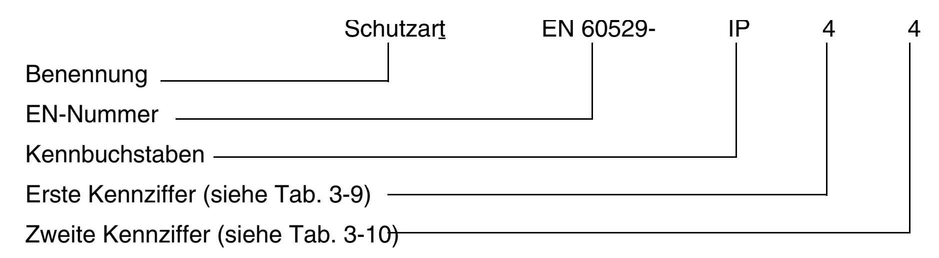
b) Schutz der Betriebsmittel gegen schädliches Eindringen von Wasser (Wasserschutz)

Bezeichnung

Die Schutzarten werden durch ein Kurzzeichen gekennzeichnet, das sich aus den zwei stets gleich bleibenden Kennbuchstaben IP (International Protection) und zwei nachfolgenden Kennziffern für die Schutzgrade zusammensetzt:

Die erste Kennziffer gibt den Schutzgrad des Berührungs- und Fremdkörperschutzes an. Die zweite Kennziffer gibt den Schutzgrad gegen schädliches Eindringen von Wasser an.

Für die Benennung des vollständigen Kurzzeichens (Kennbuchstaben und Schutzgrad-Kennziffern) ist der Begriff „Schutzart“ zu verwenden.



Ein Gehäuse mit dieser Bezeichnung ist gegen das Eindringen von festen Fremdkörpern über 1 mm Durchmesser und gegen Spritzwasser geschützt.

Weicht die Schutzart eines Teiles des Betriebsmittels, z. B. Anschlussklemmen, von der des Hauptteiles ab, so ist das Kurzzeichen für die Schutzart des abweichenden Teiles besonders anzugeben. Die niedrige Schutzart wird dabei zuerst genannt.

Beispiel: Klemmen IP 00 – Gehäuse IP 54

Schutzgrade für den Berührungs- und Fremdkörperschutz

Erste Kennziffer	Schutzgrad (Berührungs- und Fremdkörperschutz)
0	kein besonderer Schutz
1	Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser größer als 50 mm (große Fremdkörper)[1). Kein Schutz gegen absichtlichen Zugang, z. B. mit der Hand, jedoch Fernhalten großer Körperflächen.
2	Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser größer als 12 mm (mittelgroße Fremdkörper)[1). Fernhalten von Fingern oder ähnlichen Gegenständen.
3	Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser größer als 2,5 mm (kleine Fremdkörper)[1) 2). Fernhalten von Werkzeugen, Drähten oder ähnlichem von einer Dicke größer als 2,5 mm.
4	Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser größer als 1 mm (kornförmige Fremdkörper)[1) 2). Fernhalten von Werkzeugen, Drähten oder ähnlichem von einer Dicke größer als 1 mm.
5	Schutz gegen schädliche Staubablagerungen. Das Eindringen von Staub ist nicht vollkommen verhindert; aber der Staub darf nicht in solchen Mengen eindringen, dass die Arbeitsweise des Betriebsmittels beeinträchtigt wird (staubgeschützt)[3). Vollständiger Berührungsschutz.
6	Schutz gegen Eindringen von Staub (staubdicht). Vollständiger Berührungsschutz

1) Bei Betriebsmittel der Schutzgrade 1 bis 4 sind gleichmäßig oder ungleichmäßig geformte Fremdkörper mit drei senkrecht zueinander stehenden Abmessungen größer als die ent sprechenden Durchmesser-Zahlenwerte am Eindringen gehindert.

2) Für die Schutzgrade 3 und 4 fällt die Anwendung dieser Tabelle auf Betriebsmittel mit Abflusslöchern oder Kühlluftöffnungen in die Verantwortung des jeweils zuständigen Fachkomitees.

3) Für den Schutzgrad 5 fällt die Anwendung dieser Tabelle auf Betriebsmittel mit Abflusslöchern in die Verantwortung des jeweils zuständigen Fachkomitees.

Tab. 3-9: Schutzgrade für die erste Kennziffer

Schutzgrade für den Wasserschutz

Zweite Kennziffer	Schutzgrad (Wasserschutz)
0	kein besonderer Schutz
1	Schutz gegen tropfendes Wasser, das senkrecht fällt. Es darf keine schädliche Wirkung haben (Tropfwasser).
2	Schutz gegen tropfendes Wasser, das senkrecht fällt. Es darf bei einem bis zu 15° gegenüber seiner normalen Lage gekippten Betriebsmittel (Gehäuse) keine schädliche Wirkung haben (schrägfallendes Tropfwasser).
3	Schutz gegen Wasser, das in einem beliebigen Winkel bis 60° zur Senkrechten fällt. Es darf keine schädliche Wirkung haben (Sprühwasser).
4	Schutz gegen Wasser, das aus allen Richtungen gegen das Betriebsmittel (Gehäuse) gerichtet wird. Es darf keine schädliche Wirkung haben (Spritzwasser).
5	Schutz gegen einen Wasserstrahl aus einer Düse, der aus allen Richtungen gegen das Betriebsmittel (Gehäuse) gerichtet wird. Er darf keine schädliche Wirkung haben (Strahlwasser).
6	Schutz gegen schwere See oder starken Wasserstrahl. Wasser darf nicht in schädlichen Mengen in das Betriebsmittel (Gehäuse) eindringen (Überfluten).
7	Schutz gegen Wasser, wenn das Betriebsmittel (Gehäuse) unter festgelegten Druck- und Zeitbedingungen in Wasser getaucht wird. Wasser darf nicht in schädlichen Mengen eindringen (Eintauchen).
8	Das Betriebsmittel (Gehäuse) ist geeignet zum dauernden Untertauchen in Wasser bei Bedingungen, die durch den Hersteller zu beschreiben sind (Untertauchen).
[1] Dieser Schutzgrad bedeutet normalerweise ein luftdicht verschlossenes Betriebsmittel. Bei bestimmten Betriebsmitteln kann jedoch Wasser eindringen, sofern es keine schädliche Wirkung hat.	

Tab. 3-10: Schutzgrade für die zweite Kennziffer

3.3 Anforderungen zur Störfestigkeit (EMV)

Die Messgeräte und ihre elektronischen Verstärker und Recheneinheiten werden immer leistungsfähiger und empfindlicher. Die μ-Elektronik hat mit der digitalen Datenverarbeitung neue Wege frei gemacht. Das erweiterte Einsatzspektrum hat leider auch eine Schattenseite. Denn Empfindlichkeit heißt auch anfälliger gegenüber Störeinflüssen.

Im Zuge des gemeinsamen europäischen Marktes wurden verschiedene Richtlinien von der Europäischen Gemeinschaft (EU) verabschiedet. Diese besagen, dass alle Geräte, die innerhalb der EU in den Verkehr gebracht werden, die geltenden Richtlinien erfüllen müssen, d. h. dass sie den Anforderungen der gültigen EN-Normen genügen. Zur Bestätigung werden diese Geräte mit dem CE-Zeichen gekennzeichnet und eine Konformitätsbescheinigung erstellt.

Für die Durchflussmesser von **ABB** ist zur Zeit die EMV-Richtlinie 89/336/EWG bestimmend. Danach sind alle Geräte, die unter diese Richtlinie fallen, ab dem 01. 01. 1996 mit dem CE-Zeichen zu kennzeichnen. Das CE-Zeichen in Verbindung mit der Konformitätsbescheinigung besagt, dass die Geräte den zur Zeit geltenden EN-Normen (Fachgrundnorm EN 50081 und EN 50082) genügen.

Den Fachgrundnormen werden künftig weitere Produktnormen folgen, die dann von den verschiedenen Geräten eingehalten werden müssen. Neben den Anforderungen der EMV-Richtlinie gibt es auch die besonderen Anforderungen der chemischen Industrie, welche in der so genannten NAMUR-Empfehlung festgelegt sind. Unsere Geräte werden nach der NAMUR-Empfehlung geprüft, dessen Anforderungen die der Fachgrundnormen einschließen bzw. diese überschreiten.

Die Ursachen von Störungen sind:

- Schwankungen der Versorgungsspannung
- Unterbrechungen der Versorgungsspannung
- Entladung statischer Elektrizität
- Elektromagnetische Felder
- Transiente Überspannungen in Form von Impulsgruppen (Burst) auf Versorgungsleitungen
- Transiente Überspannungen in Form von Impulsgruppen auf Daten-, E/A- und Signalleitungen
- Transiente Überspannungen in Form von energiereichen Einzelimpulsen auf Versorgungsleitungen

Als Beispiele für Verursacher von Störsignalen seien genannt: elektrische und elektronische Schalter, Relais, Schütze, Frequenzumrichter, Magnetventile aber auch atmosphärische Störer, z. B. Blitze.

Das Störverhalten beurteilt die Reaktion eines Gerätes auf eine Störung, und zwar nach drei Bewertungskriterien:

a. keine Funktionsminderung
Gefordert wird vorwiegend bei Digitalgeräten keine erkennbare Auswirkung, bei vorwiegend Analoggeräten erkennbare Beeinträchtigungen aber innerhalb der Fehlergrenzen.

b. Funktionsminderung
Ermittelt wird die Beeinträchtigung der Funktion außerhalb der Fehlergrenzen während der Zeitdauer der Störeinwirkung, jedoch selbsterholend, d. h. danach wird der Ursprungszustand wieder hergestellt.

c. Funktionsverlust
Ermittelt wird natürlich besonders der Funktionsverlust mit Beginn der Störeinwirkung bis zum automatischen Wiederanlauf oder bis zur manuellen Wiederinbetriebnahme.

In der NAMUR-Empfehlung (5/93) sind die Grenzwerte für die einzelnen Störeffekte vorgegeben. Die wichtigsten Anforderungen lauten:

1. Netzversorgungstoleranzen

AC	U_N	+10 % - 15 %
DC	U_N	+20 % - 15 %
Frequenztoleranz	f_N	± 2 %

Bei Über- und Unterschreiten der Toleranzwerte müssen die Geräte/Anlagen einen automatischen Wiederanlauf ermöglichen oder einschaltbereit in definierter Sicherheitsstellung stehen.

2. Netzunterbrechung

Beurteilung bei mindestens 10 Unterbrechungen

Ausgangszustand	Unterbrechungszeit	Wiederholrate	
AC (0,85 · U_N) DC (0,85 · U_N)	0...20 ms	1 s	keine Funktions-minderung
AC (0,85 · U_N) DC (0,85 · U_N)	> 20 ms	> 1 s	automatischer Wiederanlauf oder einschaltbereit in definierter Sicher-heitsstellung

3. Einschaltstrombegrenzung

Der maximal mögliche Einschaltstromstoß-Scheitelwert und dessen zeitlicher Verlauf sind anzugeben. Der Einschaltstromstoß-Scheitelwert darf das 15-fache des Nenn-strom-Scheitelwertes nicht überschreiten.

4. Transiente Überspannungen auf Geräte über Versorgungsleitungen
(Unipolare Stossspannungen)

	Stromversorgung	
	nicht von übrigen Betriebs-mitteln getrennt (z. B. 230/400-V-Netze) û	von übrigen Betriebs-mitteln getrennt (z. B. 24-V-Netze) û
Zwischen den Leitungen	1 kV	0,5 kV
Zwischen jeder Leitung und Bezugserde	2 kV	1 kV

5. Transiente Überspannungen auf Geräte über Versorgungsleitungen
(Impulsgruppen [Bursts])

	û
Zwischen jedem Anschluss der Versorgungsleitung und dem Schutzleiter-anschluss der Stromversorgung	2 kV

6. Transiente Überspannungen auf Daten-, E/A- und Signalleitungen
(Impulsgruppen [Bursts])

	û
Einkopplung mit kapazitiver Koppelstrecke	1 kV

7. Entladung statischer Elektrizität

		û Kontakt- entladung	û Luft- entladung
Direkte Entladung	Gehäuse im geschlossenen Zustand an allen berührbaren Teilen	6 kV	8 kV
Indirekte Entladung	Vertikale/horizontale Koppelplatte	6 kV	

8. Elektromagnetische Felder

	Spannung	Prüfmethode
9 kHz ... 26 MHz	10 V	Leitungsgeführt über Koppeleinrichtungen auf alle Leitungen
26 MHz... 80 MHz	10 V	
80 MHz...230 MHz	[10 V]	

	Feldstärke	Prüfmethode
26 MHz... 80 MHz	[10 V/m]	Antennenbestrahlung
80 MHz...230 MHz	10 V/m	
230 MHz...500 MHz	10 V/m	
500 MHz... 1 GHz	3 V/m	

Für spezielle Einsatzfälle vereinbaren Anwender und Hersteller zugeschnittene, meist erhöhte Anforderungen. Prüfungen an Geräten nach den genannten Bedingungen nehmen firmeninterne oder neutrale Institute vor.

Die Prüfprotokolle oder Gutachten sind Bestandteil des Gerätes oder der Gerätetypen. Dem Anwender wird damit eine optimale Störfestigkeit zugesichert.

3.4 Explosionsschutz

Unter den vielen Produkten und Zwischenprodukten der chemischen und verfahrenstechnischen Industrie gibt es eine große Anzahl, die zusammen mit anderen Stoffen oder mit dem Sauerstoff der Luft explosionsfähige Gemische bilden können. Mess- und Regelgeräte, die mit derartigen Gemischen in Verbindung treten, dürfen Explosionen nicht herbeiführen, müssen aber trotzdem einwandfrei funktionieren.

Damit es zur Explosion kommt, müssen einige Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein.

a) Ein ausreichender Dispersionsgrad (Grad der Zerstäubung) bei Nebeln oder Stäuben verlangt Teilchengrößen zwischen 0,1 und 0,001 mm. Bei Gasen ist der notwendige Grad naturgegeben.

b) Erst wenn die Konzentration eines brennbaren Stoffes in Luft einen Mindestwert überschreitet, ist die Explosion möglich. Andererseits gibt es einen Maximalwert (zu fettes Gemisch), bei dem eine Explosion nicht mehr zustandekommt.

c) Natürlich muss eine ausreichende Menge des Gemisches zur Verfügung stehen. Bereits 10 Liter explosionsfähiger Atmosphäre gelten als gefährlich.

d) Eine wirksame Zündquelle muss genügend Energie besitzen, um die Explosion anzufachen.

Bei Betrachtung dieser Kriterien ergeben sich zwangsläufig die Maßnahmen zur Verhinderung einer Explosion:

Explosionsfähige Gemische sind zu vermeiden, die Menge ist zu begrenzen, die Zündung muss verhindert werden, im äußersten Fall sind die Auswirkungen einzugrenzen.

Diese Maßnahmen werden bei der Konstruktion von Geräten berücksichtigt, indem beispielsweise der Raum, in dem sich ein explosionsfähiges Gemisch sammelt, sehr klein gestaltet wird oder indem der Energieinhalt eines möglichen Zündfunkens gering gehalten wird oder indem die Explosion auf einen kleinen Raum begrenzt wird.

Gliederung der explosionsgefährdeten Bereiche

Explosionsgefährdete Bereiche werden nach der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer gefährlichen Atmosphäre in Zonen eingeteilt.

1. Durch brennbare Gase, Dämpfe oder Nebel explosionsgefährdete Bereiche.

   Zone 0 umfasst Bereiche, in denen gefährliche explosionsfähige Atmosphäre ständig oder langzeitig vorhanden ist.

   Zone 1 umfasst Bereiche, in denen damit zu rechnen ist, dass gefährliche Atmosphäre gelegentlich auftritt.

   Zone 2 umfasst Bereiche, in denen damit zu rechnen ist, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphäre nur selten und dann auch nur kurzzeitig auftritt.

Zone	0	1	2	sicherer Bereich
gefährliche explosionsfähige Atmosphäre	ständig oder langzeitig	gelegentlich	selten und kurzzeitig	praktisch nie

2. Durch brennbare Stäube explosionsgefährdete Bereiche

   Zone 10 umfasst Bereiche, in denen durch Staub gefährliche explosionsfähige Atmosphäre ständig oder langzeitig vorhanden ist.

   Zone 11 umfasst Bereiche, in denen damit zu rechnen ist, dass gelegentlich durch Aufwirbeln abgelagerten Staubes gefährliche explosionsfähige Atmosphäre kurzzeitig auftritt.

Gegenüberstellung der Einsatzbereiche nach Zonen und Kategorien

	Kategorie 1 sehr hohes Sicherheitsmaß		Kategorie 2 hohes Sicherheitsmaß		Kategorie 3 normales Sicherheitsmaß	
ausreichende Sicherheit	durch 2 Schutz-maßnahmen bei 2 Fehlern		bei häufigen Gerätestörungen/ bei 1 Fehler		bei störungsfreiem Betrieb	
Einsatz in	Zone 0	Zone 10 (VDE) Zone 20 (IEC)	Zone 1	Zone 21 (IEC)	Zone 2	Zone 11 (VDE) Zone 22 (IEC)
Atmosphäre G = Gas; D = Staub	G	D	G	D	G	D

Temperaturklasse

Zur Beurteilung der Gefährlichkeit von brennbaren Stoffen gibt es die Klassifizierung nach den **Zündtemperaturen** und nach dem Zünddurchschlagsvermögen. Die Zündtemperatur ist die niedrigste Temperatur einer erhitzten Wand, an der sich das brennbare Gemisch gerade noch entzündet (Zündquellen sind z. B. heiße Oberflächen, Flammen, elektrisch oder mechanisch erzeugte Funken, Lichtstrahlung, Stoßwellen, chemische Reaktionen).

Deshalb werden Gase/Dämpfe in Temperaturklassen eingeteilt und die Betriebsmittel (das sind hier die angesprochenen Messgeräte) entsprechend zugeordnet. Die maximale Oberflächentemperatur eines Betriebsmittels muss stets kleiner sein als die Zündtemperatur der gefährdeten Gemisches.

Zündtemperatur (°C)	Temperaturklasse
> 450	T1
> 300	T2
> 200	T3
> 135	T4
> 100	T5
> 85	T6

Explosionsgruppen

Die Zündfähigkeit und das Zünddurchschlagvermögen eines explosionsfähigen Gemisches sind stofftypische Eigenschaften. Diese Angaben sind besonders wichtig für die Konstruktion von Betriebsmitteln. Bei eigensicheren elektrischen Betriebsmitteln ist die Zündenergie das Kriterium für die Zündfähigkeit. Je kleiner die erforderliche Zündenergie, umso gefährlicher das Gemisch. Das Zünddurchschlagsvermögen liefert den Hinweis auf die Ausbildung von Grenzspaltweiten in den Betriebsmitteln der druckfesten Kapselung.

Explosionsgruppe	Zündenergie (EN 50020)	Testgas	Bereich
I	< 260µ J	Methan	Schlagwetterschutz
II A	< 160µ J	Propan	
II B	< 60µ J	Ethylen	Explosionsschutz
II C	< 20µ J	Wasserstoff	

Gase und Dämpfe werden nach den genannten Kriterien klassifiziert. Die nachstehende Tabelle zeigt die Zuordnung einiger Stoffe. Das für diese Stoffe verwendete Betriebsmittel muss entsprechend qualifiziert sein.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
I	Methan					
II A	Aceton Aethan Aethylacetat Ammoniak Benzol (rein) Essigsäure Kohlendioxid Methanol Propan Toloul	Aethylalkohol i-Amylacetat n-Butan n-Butylalkohol	Benzine Diesel- kraftstoff Flugzeug- kraftstoff Heizöle n-Hexan	Acetaldehyd Aethyläther		
II B	Stadtgas (Leuchtgas)	Aethylen				
II C	Wasserstoff	Acethylen				Aethylnitrat Schwefel- kohlenstoff

Zündschutzarten

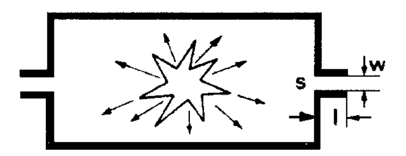
Der Explosionsschutz elektrischer Betriebsmittel lässt sich durch die Anwendung der nachstehend aufgeführten Zündschutzarten erreichen.

Zündschutzart Druckfeste Kapselung d (EN50018)

Grundprinzip:

Teile, die einer explosionsfähigen Atmosphäre zünden können, sind in ein Gehäuse eingeschlossen, das bei der Explosion eines explosionsfähigen Gemisches im Innern den Druck aushält und eine Übertragung der Explosion auf die das Gehäuse umgebende Atmosphäre verhindert.

Schematische Darstellung



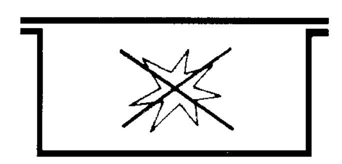
Anwendungen:
Schaltgeräte, Befehls-und Anzeigegeräte, Steuerungen, Motoren, Transformatoren, Leuchten und an-dere funkenerzeugende Teile.

Zündschutzart Erhöhte Sicherheit e (EN50019)

Grundprinzip:

Hier sind Maßnahmen getroffen, um mit einem erhöhten Grad an Sicherheit die Möglichkeit unzulässig hoher Temperaturen und das Entstehen von Funken und Lichtbögen im Inneren oder an äußeren Teilen elektrischer Betriebsmittel, bei denen diese im normalen Betrieb nicht auftreten, zu verhindern.

Schematische Darstellung



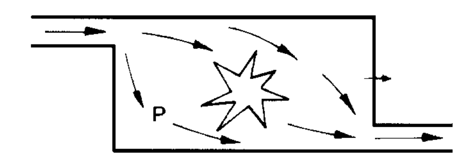
Anwendungen:
Klemmen und Anschlusskästen, Steuerkästen zum Einbau von Ex-Bauteilen (die in einer anderen Zündschutzart geschützt sind), Käfigläufermotoren, Leuchten.

Zündschutzart Überdruckkapselung p (EN50016)

Grundprinzip:

Das Eindringen einer explosionsfähigen Atmosphäre in das Gehäuse von elektrischen Betriebsmitteln wird dadurch verhindert, dass im Gehäuseinneren ein Zündschutzgas (Luft, inertes oder anderes geeignetes Gas) unter Überdruck gegenüber der umgebenden Atmosphäre gehalten wird. Der Überdruck wird mit oder ohne laufende Zündschutzgasdurchspülung aufrecht erhalten.

Schematische Darstellung



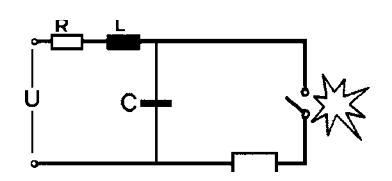
Anwendungen:
Wie oben, aber besonders für große Geräte und ganze Räume.

Zündschutzart Eigensicherheit i (EN50020)

Grundprinzip:

Die im explosionsgefährdeten Bereich eingesetzten Betriebsmittel enthalten nur eigensichere Stromkreise. Ein Stromkreis ist eigensicher, wenn kein Funke und kein thermischer Effekt, die unter festgelegten Prüfungsbedingungen (welche den normalen Betrieb und bestimmte Fehlerbedingungen umfassen) auftreten, die Zündung einer bestimmten explosionsfähigen Atmosphäre verursachen kann.

Schematische Darstellung



Anwendungen:
Mess-und Regeltechnik, Kommunikationstechnik

Bei Eigensicherheit unterscheidet man die Kategorien ia und ib.

ia zum Einsatz in Zone 0.
Die Geräte müssen so konzipiert sein, dass im Falle eines Fehlers oder bei jeder möglichen Kombination von zwei Fehlern eine Zündung ausgeschlossen ist.

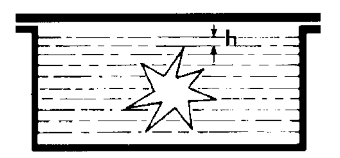
ib zum Einsatz in Zone 1.
Die Geräte müssen so konzipiert sein, dass im Falle eines Fehlers eine Zündung ausgeschlossen ist.

Zündschutzart Ölkapselung O (EN50015)

Grundprinzip:

Elektrische Betriebsmittel oder Teile von elektrischen Betriebsmitteln werden durch Einschließen in Öl in dem Sinne sicher gemacht, dass eine explosionsfähige Atmosphäre über der Oberfläche oder außerhalb des Gehäuses nicht gezündet wird.

Schematische Darstellung



Anwendungen:
Transformatoren (nur noch selten verwendet)

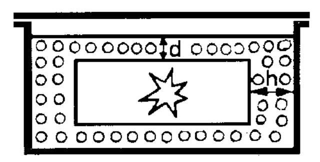
Zündschutzart Sandkapselung q (EN50017)

Grundprinzip:

Durch Füllung des Gehäuses eines elektrischen Betriebsmittels mit einem feinkörnigen Füllgut wird erreicht, dass bei bestim-mungsmäßigen Gebrauch ein in seinem Gehäuse entstehender

Lichtbogen eine das Gehäuse umgebende explosionsfähige Atmosphäre nicht zündet. Es darf weder eine Zündung durch Flammen noch eine Zündung durch erhöhte Temperaturen an der Gehäuseoberfläche erfolgen.

Schematische Darstellung



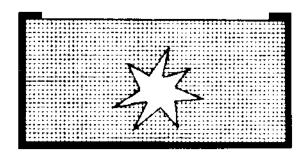
Anwendungen:
Transformatoren , Kondensatoren, Heizleiteranschlusskästen

Zündschutzart Vergusskapselung m (EN50028)

Grundprinzip:

Teile, die eine explosionsfähige Atmosphäre zünden können, werden so in eine gegenüber Umgebungseinflüssen genügend widerstandsfähige Vergussmasse eingebettet, dass diese explosionsfähige Atmosphäre weder durch Funken noch durch Erhitzung, die innerhalb der Vergusskapselung entstehen können, gezündet werden kann.

Schematische Darstellung



Anwendungen:
Schaltgeräte für kleine Leistungen, Befehls- und Meldegeräte, Anzeigegeräte, Sensoren.

Explosionsgeschützte elektrische Geräte im freien Warenverkehr

Die Voraussetzungen für einen ungehinderten Warenverkehr innerhalb der Europäischen Gemeinschaft wird durch EG-Richtlinien geregelt. Seit 1996 ist die Richtlinie 94/9/EG (ATEX 100a) anzuwenden.

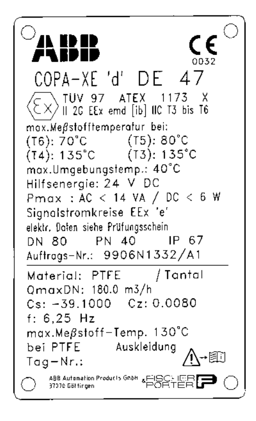
Die auf Grundlagen der Richtlinie 76/117/EWG berücksichtigten harmonisierten Normen EN 50014...EN 50020 und EN 50028 werden bei Anwendung der ATEX 100a durch die neuesten überarbeiteten Ausgaben ersetzt. Zusätzlich fordert die ATEX 100a ein Konformitätsbewertungsverfahren der Qualitätssicherung der Hersteller, die die besonderen Anforderungen bei der Entwicklung, Konstruktion und der Produktion von explosionsgeschützten Betriebsmitteln berücksichtigt.

Geräte, die entsprechend der ATEX 100a geprüft und für die eine EG-Baumusterprüfbescheinigung ausgestellt wurde, werden zusätzlich mit der CE-Kennzeichnung versehen. Ergänzend wird die Kennnummer der Prüfstelle angegeben, die eine Bewertung der Qualitätssicherung vorgenommen hat.

Gegenüberstellung der Unterschiede zwischen alter und neuer Ex-Richtlinie

Richtlinien	Richtlinie NEU: 94/9/EWG ATEX100a
Gültig und anwendbar bis 30.06.2003 d. h. alle bestehenden Zulassungen werden ungültig (Geräte können weiter betrieben werden).	Gültig und anwendbar seit 01. 03. 1996
Benannte Stellen in Deutschland PTB, DMT	Benannte Stellen in Deutschland z. B. PTB, DMT, TÜV-Hannover, BAM-Berlin
Prüfstelle erstellt Konformitätsbescheinigung	Prüfstelle erstellt EG-Baumusterprüfbescheinigung Hersteller erstellt Konformitätserklärung
Prüfscheinnummer: z. B. PTB Nr. Ex-95.D.2154 X Kennzeichnung:	Prüfscheinnummer: z. B. TÜV 97 ATEX 1153 Kennzeichnung: mit Nr. der benannten Stelle, die QS-System bewertet hat (0032 für TÜV-Hannover)
Normen: EN 50014 ff, alte Ausgaben	Normen: EN 50014 ff, neue Ausgaben
Gruppe I —> Grubenbau Grubengas Zone 0 und Staub Zone 10 Grubengas Zone 1 und Staub Zone 11	Gerätegruppe I —> Grubenbau Kategorie M1 Kategorie M2
Gruppe II —> expl. Bereich Gas Zone 0 Gas Zone 1 Gas Zone 2 Staub Zone 10 Staub Zone 11	Gruppe II —> expl. Bereich Kategorie 1 und G für Gas, Dämpfe, Nebel Kategorie 2 und G für Gas, Dämpfe, Nebel Kategorie 3 und G für Gas, Dämpfe, Nebel Kategorie 1 und D für Staub Kategorie 2 und D für Staub
Beispiel: EEx ib IIC T4 (für Einsatz in Zone 1)	Beispiel: II 2G EEx ib IIC T4 Techn. Daten und sicherheitsrelevante Abschnitte der Betriebsanleitung müssen zusätzlich in der Landessprache des Verwenderlandes vorliegen.

Beispiel einer Ex-Schutz-Klassifizierung und Kennzeichnung



Prüfstelle — Jahr d. Zulassung — Richtlinie 94/9 EWG — lfd. Nummer — besondere Bedingungen

T Ü V 9 7 A T E X 1 1 7 3 X
(Prüfschein-Nr. des TÜV)

II 2 G EEx emd [ib] II C T3 bis T6

- T3 bis T6: Temperaturklasse
- II C: Explosionsgruppe
- emd [ib]: Zündschutzarten
  - d: Druckfeste Kapselung
  - e: Erhöhte Sicherheit
  - m: Vergusskapselung
  - ib: Eigensicher, auch beim Aufheben von einem Fehler
- EEx: CENELEC-Kennzeichen für den Ex-Schutz

II = Explosionsgruppe
2 = Kategorie 2
G = Gas, Dämpfe, Nebel

3.5 Korrosion

Unter Korrosion versteht man die Zerstörung von Werkstoffen durch chemische Reaktionen. In der Regel grenzt man den Begriff ein auf die Veränderung eines Metallgefüges durch wässrige Lösungen. Das ist die elektrolytische Korrosion, deren bekanntestes Beispiel die Rostbildung ist.

Metalle mit ihren freien Elektronen sind gute elektrische Leiter. Die Leitfähigkeit wässriger Korrosionsmedien ist geringer, den Stromtransport übernehmen Ionen. Beim Korrosionsvorgang fließt ein positiver Strom in die Flüssigkeit. Dabei gehen positiv geladene Metallionen in das Korrosionsmedium. Die Intensität dieses Vorgangs ist von der Ionenbeweglichkeit abhängig, die mit steigender Temperatur zunimmt und bei steigender Konzentration nachlässt. Auch das Spannungsgefälle fördert die Korrosion. Deshalb sind die in der elektrochemischen Spannungsreihe negativ angesiedelten unedlen Metalle wie Aluminium und Eisen stark betroffen. Resistenzproblemen geht man durch den Einsatz edler Metalle aus dem Wege.

Stoffe der organischen Chemie, Kunststoffe, zeigen ebenfalls Zerstörungseigenschaften, wenn sie mit wässrigen Lösungen zusammenkommen. Hier sind es vorwiegend Substitutionsvorgänge, die den Stoff verändern. Unter Substitution versteht man den Ersatz eines Atoms oder einer Atomgruppe durch ein anderes Atom oder eine andere Atomgruppe. Es entsteht ein Stoff mit neuen chemischen und physikalischen Eigenschaften. Die Resistenz gegenüber der Lösung kann sich verschlechtern. Bei der großen Zahl organischer Stoffe ist man bei der Beurteilung der Eigenschaften auf die Erfahrungen der Hersteller angewiesen, die in Resistenzlisten zusammengefasst sind.

Die Beständigkeitstabelle (siehe Kapitel 7) zeigt das Verhalten der bei **ABB** verwendeten Werkstoffe bei wichtigen chemischen Produkten.

3.6 Datenübertragung

Die Hauptaufgabe des dem Messwertaufnehmer nachgeschalteten Messumformers ist die Erzeugung eines dem Messwert proportionalen Ausgangssignals, das in nachgeschalteten Sekundärgeräten (Anzeiger, Schreiber, Regler) verarbeitet werden kann. Weil diese Sekundärgeräte universell eingesetzt werden, müssen die Ausgangssignale einheitlich ausgelegt sein.

Mit den so genannten intelligenten Messumformern sind die elektrisch arbeitenden Datensysteme in den Vordergrund gerückt. Noch wird die analoge Nachrichtenübermittlung bevorzugt, aber mit steigender Anzahl von Signalen erhöhen sich die Kosten pro Signal.

Die Digitaltechnik bietet erhebliche Vorteile, z. B.:

a. Die Zahl der elektrischen Verbindungsleitungen sinkt erheblich, weil nicht jeder Signalausgang eine eigene Leitung benötigt.

b. Die Kommunikation beschränkt sich nicht nur auf die Weitergabe des Messsignals. Der Datenaustausch erfolgt in beiden Richtungen, das heißt, dass die Abruf- und Einstellparameter von außen beeinflusst werden können. Eine Fehlerdiagnose ist jederzeit möglich.

c. Die digital arbeitenden Prozessrechner benötigen keinen A/D-Wandler, die ja möglicherweise einen Übertragungsfehler verursachen.

d. Das Gesamtsystem ist erweiterungsfähig ohne viel Leistungsaufwand.

e. Unempfindlich gegen Fremdstörungen auf dem Leistungsweg.

3.6.1 Pneumatisches Einheitssignal

Geräte und Anlagen mit pneumatischer Hilfsenergie werden nur noch selten verwendet. Gründe für den Rückgang sind die eingeschränkten Möglichkeiten bei der modernen Digitaltechnik, der große Aufwand bei der Erzeugung der Druckenergie und die Installationskosten. Das Einheitssignal ist der Druckbereich zwischen 0,2 und 1 bar.

3.6.2 Analoges elektrisches Einheitssignal

Das am meisten benutzte elektrische Einheitssignal ist der Gleichstrom von 0...20 oder 4...20 mA. Man spricht von einem eingeprägten Gleichstrom, und zwar deshalb, weil er bis zu einer Maximalbürde vom elektrischen Widerstand nicht beeinflusst wird. Bei den Durchflussmessumformern liegt die Bürde bei 750 bzw. 1000 Ω, was also bedeutet, dass der Widerstand im angeschlossenen Sekundärstromkreis zwischen 0 und 1000 Ω liegen darf. Weniger oft benutzt man das Signal 0...10 bzw. 2...10 mA.

3.6.3 Schaltende Ausgänge

Man unterscheidet zwei Versionen von Schaltausgängen. Zur Statussignalisierung dient der Dauerkontakt, mit dem Alarm- oder Grenzzustände gemeldet werden.

Der Alarmkontakt soll im Gefahrenfall anspringen, z. B. bei Geräteausfall oder bei kritischen Messwerten. Der Grenzkontakt ist steuerungstechnisch interessant, denn sein Zustand veranlasst möglicherweise Änderungen im Prozessverlauf. Als Beispiel seien hier der Leerlaufkontakt, die Meldung für Fließrichtungsumkehr oder der Max-Min-Zustand genannt.

Eine völlig andere Funktion hat der Impulsausgang. Kurzseitige Impulse übermitteln Daten, und zwar sind es volumenproportionale Signale, die in einem Zählwerk integriert werden können. Auf diese Weise wird aus dem Durchfluss- ein Volumensignal. Das Zählwerk zeigt das Gesamtvolumen an, das während eines bestimmten Zeitraums durch das Messgerät geflossen ist.

Elektrisch gibt es mehrere Möglichkeiten, schaltende Ausgänge zu realisieren. Passiv sind Relaiskontakte oder Optokopplerschalter. Als aktiv bezeichnet man Strom- oder Spannungsimpulse.

3.6.4 Schnittstelle

Der Datenverkehr mit einem Prozessrechner erfolgt digital. Die Schnittstelle hat die Aufgabe sämtliche Signale so umzusetzen, dass eine einwandfreie Kommunikation möglich ist. Alle Befehle, Zeichen und Werte werden in Form von Datenwörtern übertragen. Über den Aufbau und die zeitliche Abfolge entscheidet das Übertragungsprotokoll, das herstellerabhängig gestaltet ist.

ABB Automation Products arbeitet im ASCII-Code. Eine Kommunikation wird immer vom Personal-Computer (PC), von der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) oder vom Leitrechner als Master aufgebaut, das bedeutet, dass das Messgerät nur auf Anforderung Daten sendet.

Die serielle Schnittstelle **RS 232 C** oder auch **V.24** arbeitet mit einem Signalpegel von ± 15 V Rechteck

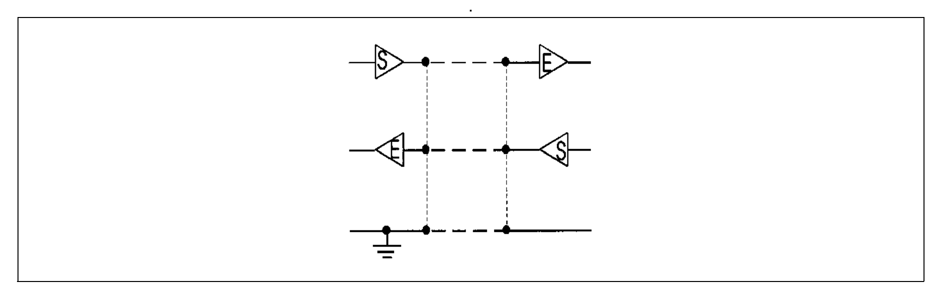


Bild 3-132: RS 232 C: E = Empfänger S = Sender

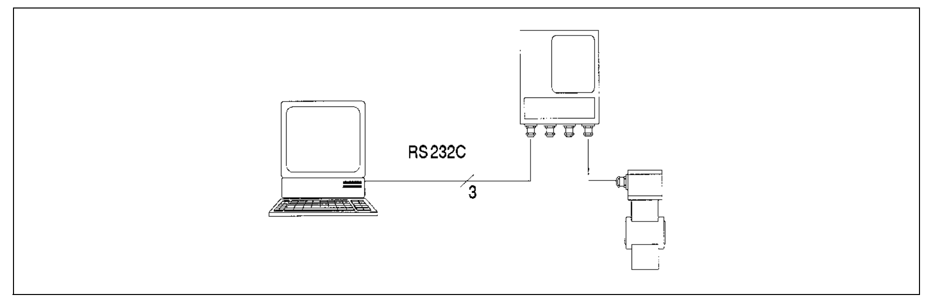


Bild 3-133: Installation mit Schnittstelle RS 232 C

Die Schnittstelle mit drei Verbindungsadern funktioniert nur im Direktverkehr mit PC o. ä.. Die Kabellänge beschränkt sich wegen des asymmetrischen Rechtecksignals und dessen Störungsanfälligkeit auf 15 m.

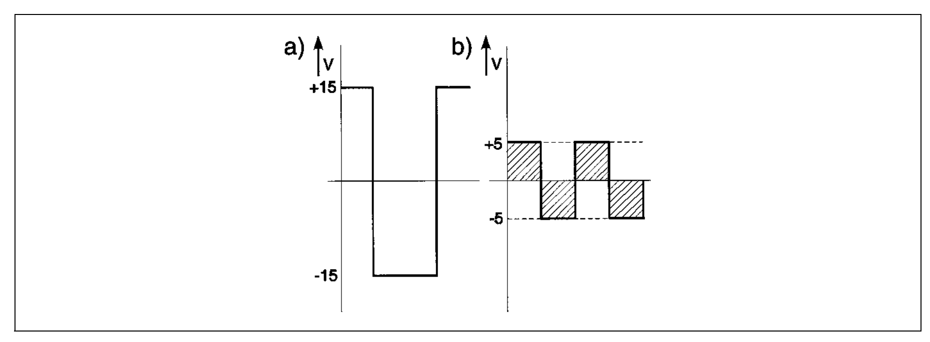


Bild 3-134: Signalform RS232 (a) und RS 485 (b) (485 führt Plus-und Minuspegel über jeweils eine der beiden Adern)

Mit dem symmetrischen Signal, das gleichartige Rechteckimpulse auf zwei Adern transportiert, arbeitet die **RS 485**-Schnittstelle wesentlich störsicherer. Deshalb darf die Kabellänge bis 1200 m sein. **ABB Automation Products** setzt vier Adern ein anstelle der zwei üblichen und verzichtet auf die Querverdrahtung.

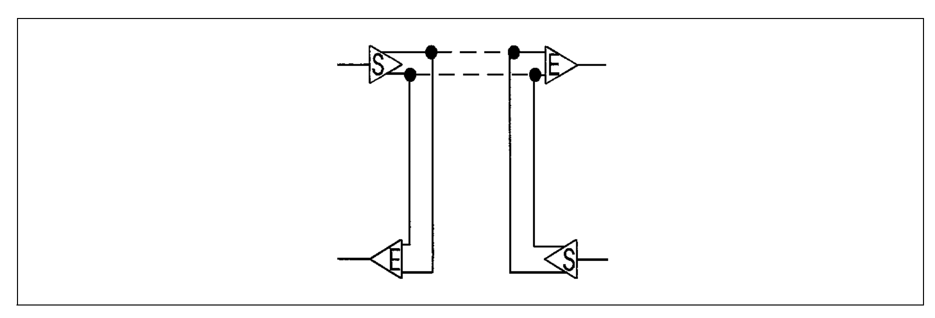


Bild 3-135: RS 485

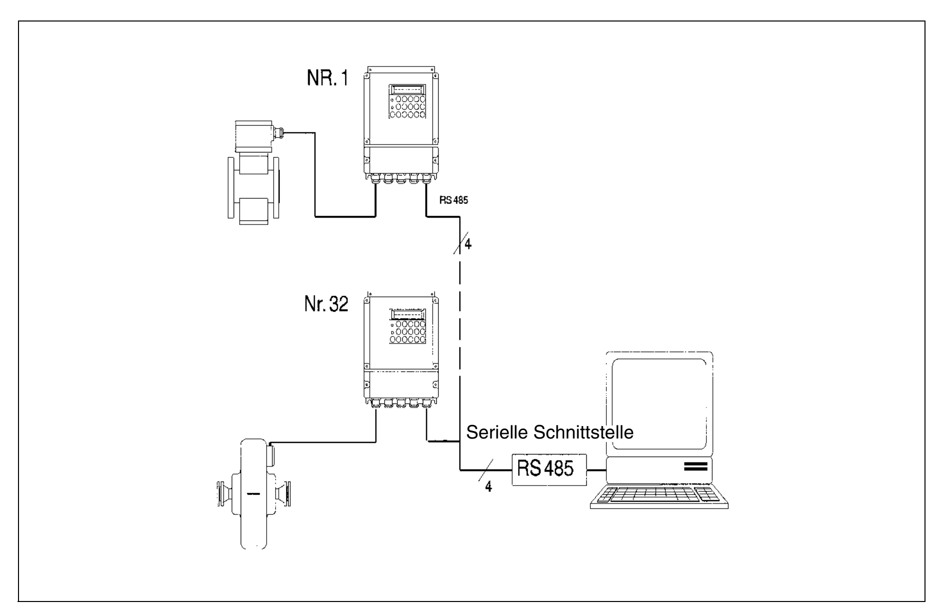


Bild 3-136: Installation mit der Schnittstelle RS 485

Mit der RS 485-Schnittstelle lässt sich ein Bussystem aufbauen mit bis zu 32 Teilnehmern. Das bedeutet, dass 32 Messgeräte parallel in eine Leitung einspeisen. Sie werden aber jeweils nur dann aktiv, wenn sie vom Master angesprochen werden.

3.6.5 HART-Protokoll

Das weltweit standardisierte Einheitssignal für die Messtechnik ist der Strom von 4...20 mA. Da dies analoge Signal nur einen Parameter übertragen kann, hat man ein System geschaffen, mit dem eine überlagerte Wechselspannung zusätzliche Informationen weitergibt. Mit dem HART-Protokoll (Highway Addressable Remote Transducer) ist eine Standardisierung mit dem Bell 202-Standard gelungen. Die SMART-Messumformer sind HART-Protokoll-fähig. Dieses HART-Protokoll verarbeitet die unterschiedlichen Parameter der verschiedenen Produkte und Hersteller. Basis des Bell 202-Standard ist das FSK-Verfahren (Frequency-Shift-Keying) bei dem die beiden Digitalwerte logisch 0 und logisch 1 durch Frequenzen von 1200 Hz und 2200 Hz ausgedrückt werden.

Weil der Signalmittelwert der Schwingung Null ist, beeinträchtigt die digitale Kommunikation ein eventuelles Analogsignal nicht.

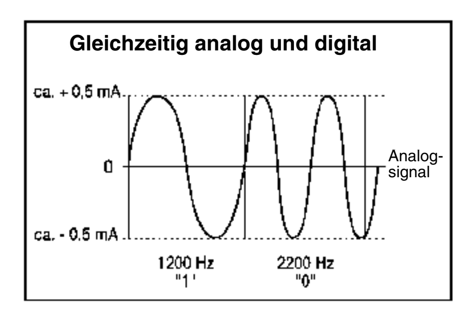


Bild 3-137: FSK-Verfahren

Die Modulierung der Kommunikationssignale übernimmt ein Modem nach Bell 202 als Umsetzer zwischen dem PC oder Leitgerät und der 4...20 mA-Leitung, in die an beliebiger Stelle eingespeist werden kann (Bild 3-138).

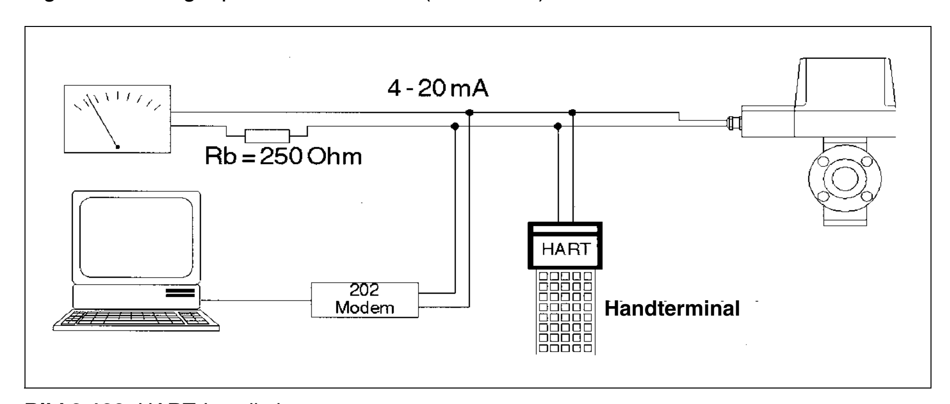


Bild 3-138: HART-Installation

Ein anderes Kommunikationsmittel ist das Handbedienungsgerät **(Handheldterminal)**, das sowohl das Modem als auch den PC beinhaltet. Es ist sicher ein elegantes und problemloses Verfahren, wenn man mit dem Handbediengerät an beliebiger Stelle der Signalleitung eingreift und Parameter abruft bzw. verändert. Und das fortlaufend bei unterschiedlichen Geräten. Das HART-Protokoll lässt den Betrieb von zwei Master-Geräten zu.

Beim Einsatz eines Multiplexers von **ABB** können über das HART-Protokoll bis zu 1024 Feldgeräte zentral überwacht und verstellt werden (Bild 3-139).

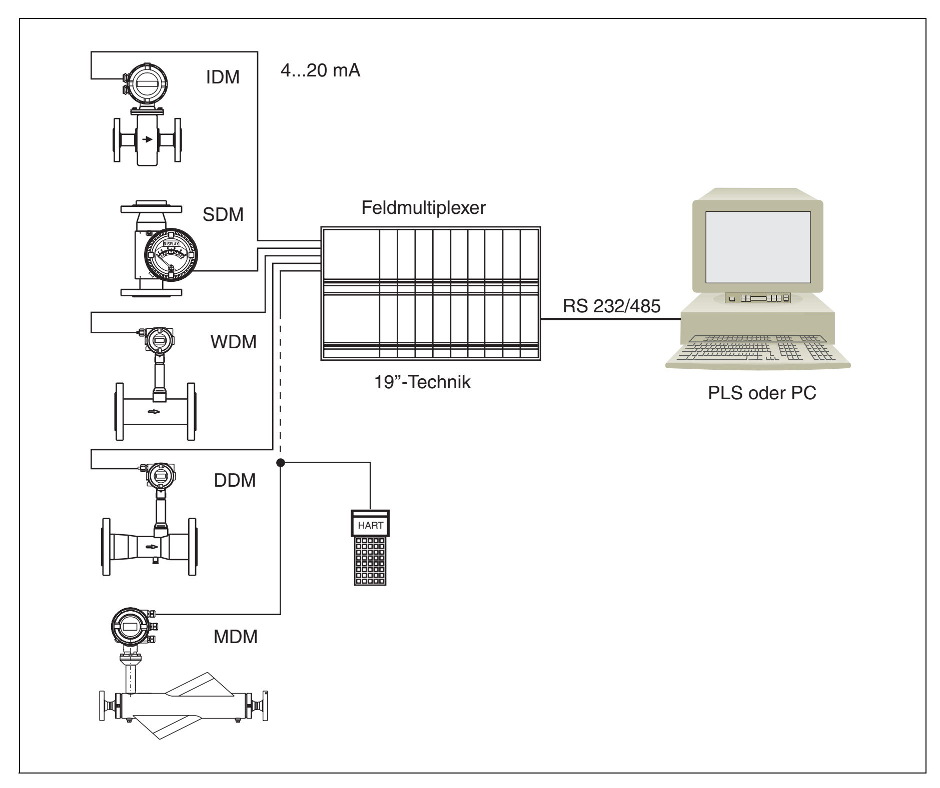


Bild 3-139: HART-Protokoll Installation mit Multiplexer

3.6.6 Feldbus in der Prozessautomatisierung

Feldbussysteme dienen als Kommunikationsmittel zu seriellen Datenaustausch zwischen dezentralen Geräten der Feldebene und der Eingabeperipherie der Prozessleitebene. Für die Prozessdatenerfassung in der Feldebene kommen neben intelligenten Sensoren und Aktoren mit Direktanschluss an den Feldbus auch intelligente „Remote I/0's" als Interface-Systeme für konventionelle Feldgeräte zum Einsatz.

Über nur zwei Drähte können alle relevanten Signale wie Ein- und Ausgabedaten, Parameter, Diagnoseinformationen, Konfiguriervorhaben und für einen weiteren Anwendungsbereich die Betriebsenergie übertragen werden. Hat ein Feldgerät einen hohen Energiebedarf, so wird die Versorgung für dieses Gerät getrennt von dem „Signalbus" geführt.

Durch die eindeutige Festlegung des Kommunikationsprotokolls ist es möglich, den Feldbus für alle Anbieter, die das Protokoll für ihre Geräte nutzen, offen zu halten. Dadurch wird erreicht, dass die heute übliche Austauschbarkeit, ermöglicht durch das 4...20 mA-Einheitssignal, auch für die Feldbustechnologie erhalten bleibt.

Dies ist neben anderen Forderungen Voraussetzung für den Einsatz von Feldbussystemen und deren bedeutenden Potential an Anwendernutzen.

Die PROFIBUS-Familie

PROFIBUS ist ein herstellerunabhängiger, offener Feldbusstandard für Anwendungen in der Fertigungs-, Prozess- und Gebäudeautomatisierung. PROFIBUS-Technologie ist in DIN 19245 als deutsche Norm und in EN 50170 als internationale Norm festgeschrieben. Damit steht jedem Produktanbieter der PROFIBUS-Standard zur Verfügung.

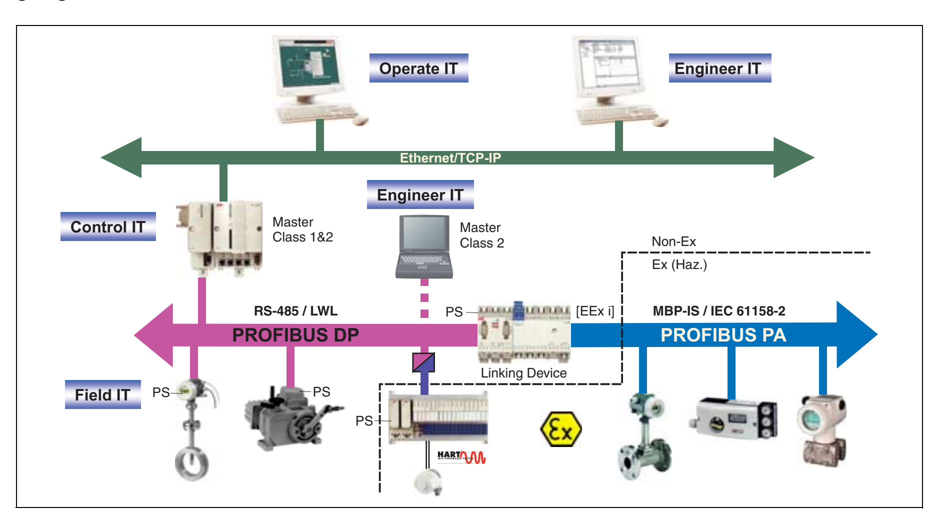


Bild 3-140: Automationsstruktur-Hierarchie, I/O's Feldbus

Die PROFIBUS-Familie wird durch drei Protokolltypen gebildet, die je nach Aufgabenstellung zur Anwendung kommen. Selbstverständlich können in einer komplexen Anlage alle drei Protokolltypen über ein PROFIBUS-Netzwerk miteinander kommunizieren. Basis hierfür ist die Kompatibilität der Protokolltypen.

Die drei Protokolltypen sind:

PROFIBUS DP	Dezentrale Peripherie
PROFIBUS PA	Prozess-Automatisierung
PROFIBUS FMS	Field Message Specification

PROFIBUS DP: der Bus für die dezentrale Peripherie

Für die Prozessautomatisierung sind die beiden Protokolltypen PROFIBUS DP und PA von Bedeutung. Die PROFIBUS Variante DP übernimmt die Kommunikation zwischen prozessnahen Komponenten (PNK) eines Prozessleitsystems und dezentraler Peripherie im Feld. PROFIBUS DP zeichnet sich u. a. durch hohe Übertragungsgeschwindigkeiten aus und wird daher häufig für dezentrale Peripheriebaugruppen oder fremdgespeiste Feldgeräte wie z. B. Stellantriebe oder Durchflussmesser eingesetzt. PROFIBUS DP/V1 ermöglicht azyklische Kommunikation.

PROFIBUS PA: Erweiterung für die Prozessautomation

PROFIBUS PA wurde für die Verfahrenstechnik entwickelt. Eigensicherheit und Speisung der Feldgeräte über die 2-Drahtbusleitung ist möglich und entspricht dem IEC 1158-2 Standard. Über diese Variante erfolgt daher die Kommunikation mit 2-Leiter-gespeisten Sensoren und Aktoren im Feld. PROFIBUS PA verwendet ein erweitertes DP-Protokoll. Die Geräteeigenschaften und ihr Verhalten werden über sogenannte Profile beschrieben und im Standard festgelegt. Durch Kopplerbaugruppen (Segmentkoppler, Gateway) werden die PA-Buslinien in das PROFIBUS DP-Netzwerk eingebunden. Damit ist sichergestellt, dass über das PROFIBUS-Gesamtsystem (DP + PA) alle Informationen in einem durchgängigem Netzwerk zur Verfügung stehen.

PROFIBUS FMS

PROFIBUS FMS hat keine wesentliche Bedeutung mehr in der Feldebene. Vorhandene Geräte können gemeinsam mit DP-Geräten an einem Bus betrieben werden.

3.6.7 FOUNDATION Fieldbus

Die Organisation Fieldbus Foundation ist im Jahre 1994 aus dem ISP (Interoperable Systems Project) und dem WorldFIP (Nordamerikanische Sektion) hervorgegangen. Mitglieder der Fieldbus Foundation sind sowohl Hersteller von Komponenten und Systemen als auch Anwender, insbesondere aus dem nordamerikanischen Bereich. Ziel dieser Organisation ist die Entwicklung und Durchsetzung eines Einheitsfeldbusses für die Automatisierung mit der Bezeichnung FOUNDATION Fieldbus (FF). Dieser Anspruch spiegelt sich u. a. in dem Leitspruch der Organisation wider: „Fieldbus Foundation – dedicated to a single international Fieldbus“. Daher ist diese Organisation auch bestrebt, ihren Feldbusstandard weitgehend in die seit über 10 Jahren laufende IEC-Feldbusnormung einzubringen. Obwohl der FOUNDATION Fieldbus also ein organisationsspezifischer Bus ist, kommt ihm eine besondere Aufmerksamkeit zu, weil er insbesondere auch den Stand der Feldbustechnologie in den USA widerspiegelt.

Man beachte jedoch, dass der FOUNDATION Fieldbus keineswegs mit der langjährig angestrebten IEC-Feldbusnorm identisch ist. Vielmehr bewegen sich beide aktuell auseinander, indem der FOUNDATION Fieldbus neben einer Low-speed-Variante (31,25 kbit/s, IEC 1158-2) als übergeordneten Bus eine High-speed-Variante mit 100 Mbit/s auf der Basis des Fast ETHERNET mit LWL eingeführt hat. Die IEC-Feldbusnorm, die inzwischen nahezu abgeschlossen ist, enthält dagegen nach wie vor auf der übergeordneten Ebene einen Bus mit 1...2,5 Mbit/s.

3.7 Kalibrieren und Eichen

3.7.1 Warum wird kalibriert?

Im Unternehmen ergibt sich die Notwendigkeit der konsequenten Rückführung von Prüfmitteln auf nationale Normale durch Kalibrierung aus der zunehmenden nationalen und internationalen Arbeitsteilung und der damit verbundenen Forderung nach Austauschbarkeit von Teilprodukten: Zulieferunternehmen, die Produkte herstellen, und Abnehmer, die diese mit anderen Teilen montieren, müssen mit dem „gleichen Maß“ messen.

Zu den technischen Gründen kommen jedoch auch juristische Gesichtspunkte. Einschlägige Gesetze und Vorschriften sind ebenso zu beachten wie die vertraglichen Vereinbarungen gegenüber dem Käufer des Produktes (Gewährleistung für die Qualität des Produktes) und die Verpflichtung, nur Produkte in den Verkehr zu bringen, deren Sicherheit bei bestimmungsgemäßem Gebrauch nicht durch Fehler beeinträchtigt ist. So weit verbindliche Forderungen zur Genauigkeit von Messgeräten vereinbart wurden, bedeutet eine Nichterfüllung dieser Forderungen das Fehlen einer zugesicherten Eigenschaft.

Der Nachweis der Auswahl adäquater Prüfmittel und ihrer einwandfreien Funktion bei der Prüfmittelüberwachung im Rahmen der Produkthaftung ist von großer Bedeutung,

weil eine systematische und vollständig dokumentierte Prüfmittelüberwachung in Verbindung mit dem lückenlosen Nachweis des zweckentsprechenden Einsatzes dieser Prüfmittel für einen ggf. erforderlichen Entlastungsnachweis unerlässlich ist.

3.7.2 Definition gemäß DIN 1319, Teil 1

Messen
Messen ist der experimentelle Vorgang, durch den ein spezieller Wert einer physikalischen Größe als Vielfaches einer Einheit oder eines Bezugswertes ermittelt wird.

Kalibrieren (Einmessen)
Kalibrieren im Bereich der Messtechnik heißt, die Messabweichung am fertigen Messgerät festzustellen.

Eichen
Das Eichen eines Messgerätes (auch einer Maßverkörperung) umfasst die von der zuständigen Eichbehörde nach den Eichvorschriften vorzunehmenden Prüfungen und die Stempelung. Durch die Prüfung wird festgestellt, ob das vorliegende Messgerät den Eichvorschriften entspricht, d. h. ob es den an seine Beschaffenheit und seine maßtechnischen Eigenschaften zu stellenden Forderungen genügt, insbesondere, ob die Beträge der Messabweichungen die Fehlergrenze nicht überschreiten. Durch die Stempelung wird beurkundet, dass das Messgerät im Zeitpunkt der Prüfung diesen Forderungen genügt hat und das aufgrund seiner Beschaffenheit zu erwarten ist, dass es bei einer Handhabung entsprechend den Regeln der Technik innerhalb der Nacheichfrist „richtig“ bleibt.

Justieren (Abgleichen)
Justieren im Bereich der Messtechnik heißt, ein Messgerät, (auch eine Maßverkörperung) so einzustellen oder abzugleichen, dass die Messabweichungen möglichst klein werden, oder die Beträge der Maßabweichung die Fehlergrenzen nicht überschreiten. Das Justieren erfordert also einen Eingriff, der das Messgerät oder die Maßverkörperung meist bleibend verändert.

3.7.3 Methoden der Durchflusskalibrierung (VDE/VDI 2641, DIN EN 24006)

Die gebräuchlichen Messmethoden sind:

Volumetrische Methode
Verfahren zur Bestimmung des Volumendurchflusses, bei dem das Volumen der Flüssigkeit mit einem kalibrierten Volumenmessbehälter und die Zeit für die Befüllung gemessen werden.

Gravimetrische Methode
Diese Methode entspricht der volumetrischen Methode. Hierbei wird jedoch das Volumen der Flüssigkeit durch Wägung unter Berücksichtigung der Dichte und der verdrängten Luftmenge ermittelt.

Anmerkung:
Bei beiden Methoden kann sowohl mit stehendem START-STOPP-Betrieb (Öffnen und Schließen einer Absperreinrichtung) als auch mit fliegendem START-STOPP-Betrieb (Bedienen einer Umschalteinrichtung) gearbeitet werden. Weiterhin unterscheidet man zwischen einem statischen und einem dynamischen Verfahren, wobei bei letzterem keine Umschaltvorrichtung erforderlich ist.

Vergleichsmethode
Die Flüssigkeit strömt durch das zu kalibrierende Messgerät und eine zweite Durchflussmesseinrichtung, die zuvor kalibriert wurde.

Methode mittels Rohrprüfstrecke
Volumetrisches Messgerät, das aus einem Rohrabschnitt mit konstantem Querschnitt und bekanntem Volumen besteht. Der Durchfluss wird von der Zeit eines Kolbens abgeleitet, die er benötigt, um frei oder angetrieben die Strecke durch den Rohrabschnitt zurückzulegen.

In Prüfständen mit höchsten Anforderungen bezüglich der Genauigkeit, kommt fast ausschließlich die statische Wägung im Zusammenwirken mit einer Umschaltvorrichtung für den fliegenden START-STOPP-Betrieb zum Einsatz. Im Hause ABB Automation Products GmbH, Werk Göttingen, werden ausschließlich statische Durchflussmessverfahren und Vergleichsmethode bei Flüssigkeitskalibrierungen und die Vergleichsmethode bei Gaskalibrierungen angewandt.

3.7.4 Randbedingungen, Messeinrichtungen

Beim Aufbau einer Durchflussmesseinrichtung wie z. B. nach der gravimetrischen Methode ist eine Reihe von Bedingungen gemäß der DIN EN 29104 zu erfüllen:

1. Strömung muss stationär sein.
2. Die Strömung in der störungsfreien Einlaufstrecke muss axialsymmetrisch und frei von Drall und Pulsation sein.
3. Die Referenz-Durchflussmessgeräte oder die kalibrierten Prüfeinrichtungen zum Messen des Durchflusses oder der Menge müssen den Anforderungen nach ISO 4185 und ISO 8316 entsprechen.
4. Der Durchflussmessbereich des Referenz-Durchflussmessgerätes oder des Kalibriernormals muss ebenso groß sein, wie der Bereich des zu prüfenden Durchflussmessgerätes. Die Fehlergrenze des Referenznormals soll nicht größer sein als ein Drittel der Fehlergrenze des zu prüfenden Gerätes.

5. Die Messeinrichtung und die Referenznormale müssen ausführlich beschrieben werden, einschließlich der Rückführbarkeit des Referenznormals und der Unsicherheit des Messaufbaus. Die Berechnung der Unsicherheit der Durchflussmessung muss ISO 5168, ISO 7066-1 und ISO 7066-2 entsprechen.
6. Der Aufnehmer muss zwischen einer geraden, störungsfreien Einlaufstrecke von mindestens 10 x DN und einer ungestörten Auslaufstrecke von mindestens 5 x DN eingebaut werden. Wenn drallfreie Geschwindigkeitsprofile gefordert werden, müssen Strömungsgleichrichter eingebaut werden.
7. Der Messaufnehmer muss während der Messung vollständig mit Flüssigkeit gefüllt sein.

Darüber hinaus müssen die physikalischen Eigenschaften der Messstoffe, zum Beispiel Dichte und Viskosität beachtet werden. Über die Reynoldzahl sind Analogierechnungen möglich, die unterschiedliche Strömungsverhalten berücksichtigen. Selbstverständlich haben auch die Hilfsmesseinrichtungen am Kalibrierprüfstand eine Genauigkeit, die so gut ist, dass diese Messungen nur geringen Einfluss auf das Durchflussmessergebnis haben.

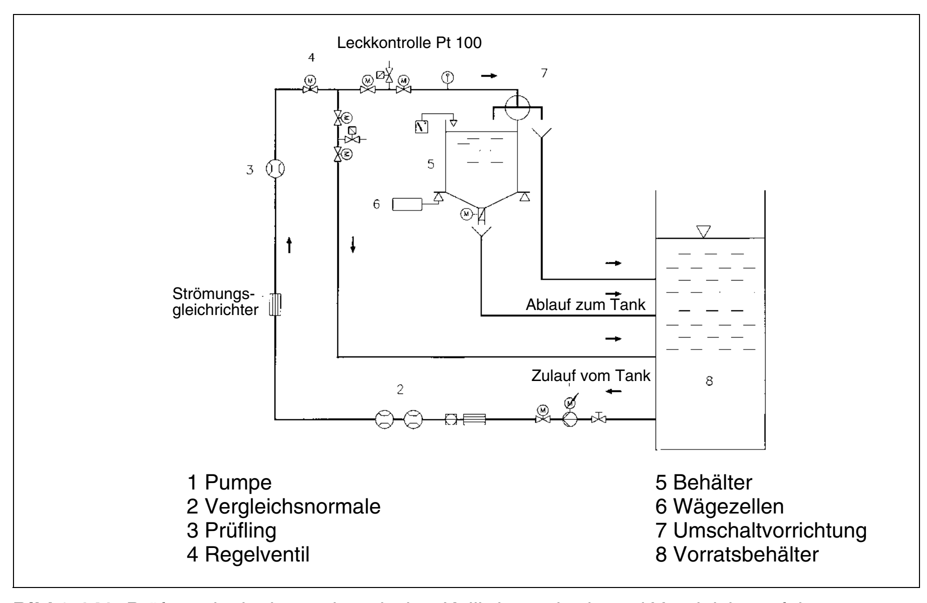


Bild 3-141: Prüfstand mittels gravimetrischer Kalibriermethode und Vergleichsverfahren

Bei dem in Bild 3-141 prinzipiell dargestellten Flüssigkeitsprüfstand durchströmt das Wasser zwei Vergleichsnormale (2), die sich gegenseitig überwachen. Das zu kalibrierende Durchflussmessgerät (3) befindet sich in einer langen ungestörten Rohrstrecke. Das Regelventil (4) und Pumpe (1) bestimmen den eingestellten Durchfluss. Das Wasser kann danach entweder direkt zum Vorratsbehälter (8) zurückgeführt werden oder

mit Hilfe der Umschaltvorrichtung (7) in den Behälter (5) geleitet werden, wo seine Masse bestimmt wird. Die Wägeeinrichtung (6) selbst wird mit Hilfe von Gewichtstücken in regelmäßigen Abständen durch das Eichamt kalibriert.

3.7.5 Zulassung der Prüfstände und Produkte

DKD-Akkreditierung

ABB Automation Products GmbH ist Träger zweier DKD-Kalibrierlaboratorien für Durchflussmessgrößen: Werk Göttingen DKD-K-18101, Werk Alzenau DKD-K-05701. Diese Kalibrierlabors sind von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) akkreditiert und überwacht. Die ausgestellten DKD-Kalibrierscheine sind ein Nachweis für die Rückführung auf nationale Normale, wie sie von den Normen DIN EN ISO 9001 und DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert werden. Kalibrierungen durch DKD-Laboratorien geben dem Anwender Sicherheit für die Verlässlichkeit von Messergebnissen, erhöhen das Vertrauen der Kunden und die Wettbewerbsfähigkeit auf dem nationalen und internationalen Markt und dienen als messtechnische Grundlage für die Mess- und Prüfmittelüberwachung im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Durch Mitarbeit des DKD in der European co-operation für Accreditation (EA) wird sichergestellt, dass vom DKD und von anderen (nationalen) Kalibrierdiensten ausgegebene Kalibrierscheine einander gleichwertig sind. In einer multilateralen Vereinbarung haben sich diese Kalibrierdienste zur gegenseitigen Anerkennung ihrer Kalibrierscheine verpflichtet. Die Unterzeichner im Bereich der Kalibrierdienste sind zur Zeit die Akkreditierungsstellen in Belgien (BKO/OBE), Dänemark (DANAK), Deutschland (DKD), Finnland (FINAS), Frankreich (COFRAC), Irland (NAB), Italien (SIT), den Niederlanden (RvA), Norwegen (NA), Österreich (BMwA), Portugal (IPQ), Schweden (SWEDAC), der Schweiz (SAS), der Slowakei (SNAS), Spanien (ENAC), der Tschechischen Republik (CAI) und dem Vereinigten Königreich (UKAS). Ferner bestehen entsprechende Übereinkommen mit den Akkreditierungsstellen Australiens (NATA), Brasiliens (INMETRO), Hong Kongs (HKAS), Neuseelands (IANZ), Singapurs (SAC), Südafrikas (SANAS) und einer Akkreditierungsstelle in den USA (A2LA).

Prüfung von Messgeräten für die Volumenmessung von strömenden Flüssigkeiten (Eichzulassung)

Verschiedene Prüfstände der ABB Automation Products, Werk Göttingen, haben durch die Physikalisch-Technischen Bundesanstalten (PTB) die Zulassung für die Eichung zugelassener Messgeräte (siehe nächsten Abschnitt) sowie für die Messtechnische Prüfung im Beisein eines Eichbeamten. Die ausgestellten Eichscheine (beinhalten keine Messwertangaben gemäß Eichordnung) oder Prüfscheine MEN (mit Angabe von Messwerten) sind ein Nachweis für die Rückführung auf nationale Normale, wie sie von den Normen DIN EN ISO 9001 und DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert werden.

Bauartzulassung zur innerstaatlichen Eichung

Um ein Messgerät eichen zu können, muss man nicht nur den dafür zugelassenen Prüfstand haben. Die Durchflussmessgeräte selbst müssen von der PTB zur innerstaatlichen Eichung zugelassen worden sein um nachzuweisen, dass sie den Anforderungen der Eichordnung gewachsen sind. Die Eichordnung EO 5 unterscheidet verschiedenartige Messstoffe und beurteilt sie individuell. So beinhaltet die Zulassung nicht nur die Gerätetype sondern auch die Nennweite, den Durchflussmessbereich und den Messstoff. ABB verfügt über folgende Zulassungen:

Zulassungen	-Zeichen	Geräte-typ	Anwendung	Nennweiten-bereich
Kaltwasser/Abwasser	6.221	IDM	Durchfluss	DN 25...DN 2000
Flüssigkeiten außer Wasser z. B.: • Sole • Bier • Bierwürze • Getränkekonzentrat • Chem. Flüssigkeiten	5.721	IDM	Durchfluss Abfüllung u. Dosierung Abfüllung u. Dosierung	DN 25...DN 150 DN 100...DN 150 DN 25...DN 80 DN 25...DN 80 DN 25 DN 25...DN 150

Zugelassene und geeichte Geräte sind an ihrem speziellen Typenschild erkennbar:

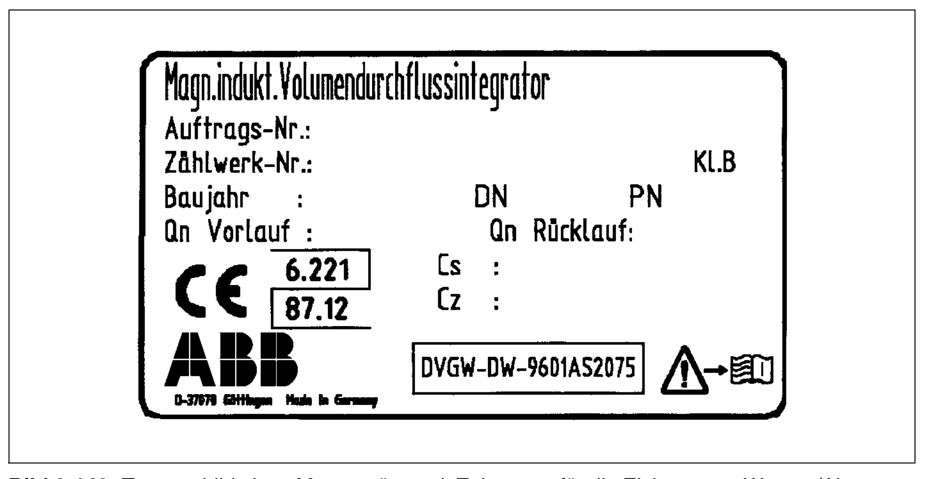


Bild 3-142: Typenschild eines Messgerätes mit Zulassung für die Eichung von Wasser/Abwasser

3.7.6 Möglichkeiten der Kalibrierung bei ABB

Werkskalibrierungen

Messgröße:	**Volumendurchfluss**	
Messgut:	Wasser	
Nennweitenbereich:	DN 1...DN 2.400	
Messbereich:[1)]	q_v = 0,2 l/min...6.000 m^3/h	
Messeingänge:	Strom	(0/4...20) mA
	Frequenz	(0...10) kHz
	Schnittstelle	nur bei ABB Automation Products Messgeräten

Messgröße:	**Volumendurchfluss**
Messgut:	Atmosphärische Luft
Nennweitenbereich:	DN 15...DN 300
Messbereich:[1)]	q_v = (2...5.400) m^3/h
Messeingänge:	Frequenz

Messgröße:	**Massedurchfluss**
Messgut:	Atmosphärische Luft, verschiedene Gase
Nennweitenbereich:	DN 25...DN 1000
Messbereich:	q_m = 1 kg/h...9000 kg/h
Messeingänge:	Strom (0/4...20 mA) Frequenz

Eichungen/Sonderprüfung MEN

Messgröße:	**Volumendurchfluss**	
Messgut:	Wasser	
Nennweitenbereich:	DN 10...DN 2.400	
Messbereich:[1)]	q_v bis max. 6.000 m^3/h	
Messeingänge:	Strom	(0/4...20) mA
	Frequenz	(0...10) kHz

[1)] angegeben ist der maximale Bereich über alle Nennweiten; die Bereiche für einzelne Nennweiten müssen separat erfragt werden.

DKD-Kalibrierungen

Messgröße:	**Volumen-/Massedurchfluss**
	Volumen/Masse von strömenden Flüssigkeiten
Messgut:	Wasser
Nennweitenbereich:	DN 50...DN 600, DN 800
Messbereich:[1)]	q_v = (5...3000) m^3/h V = (1500...50 000) Liter
	q_v = (5...3000) m^3/h m = (1500...50 000) kg
Messunsicherheit:	± 0,10 % vom Messwert
Messeingänge:	Strom (0/4...20) mA
	Frequenz (0...10) kHz

Messgröße:	**Massedurchfluss**
Messgut:	Atmosphärische Luft
Nennweitenbereich:	DN 25...DN 1000
Messbereich:	q_m = 1 kg/h...9000 kg/h
Messunsicherheit:	0,3/0,4 % vom Messwert
Messeingänge:	Strom (0/4...20 mA)
	Frequenz

[1)] angegeben ist der maximale Bereich über alle Nennweiten; die Bereiche für einzelne Nennweiten müssen separat erfragt werden.

4 Auswahlkriterien

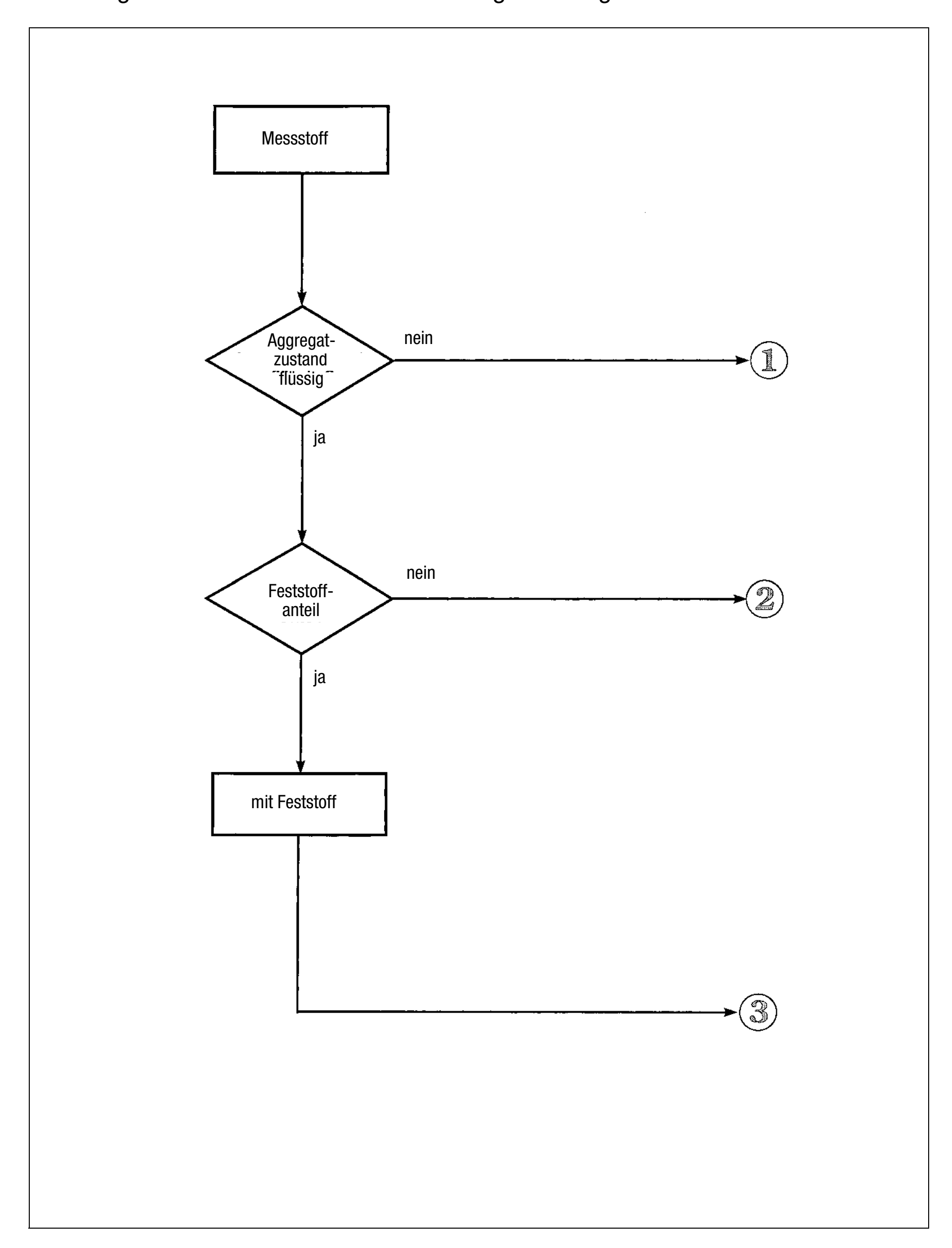
Mit einer Gegenüberstellung unterschiedlich zu beurteilender Eigenschaften von Volumenzählern und Durchflussmessern soll versucht werden, die interessantesten Gesichtspunkte für die Geräteauswahl zusammenzufassen, um so dem Anwender einen Leitfaden zu bieten. In Tabellen sind die verschiedenen Kriterien zusammengestellt, um die Prüfung für die Eignung im speziellen Einzelfall zu erleichtern.

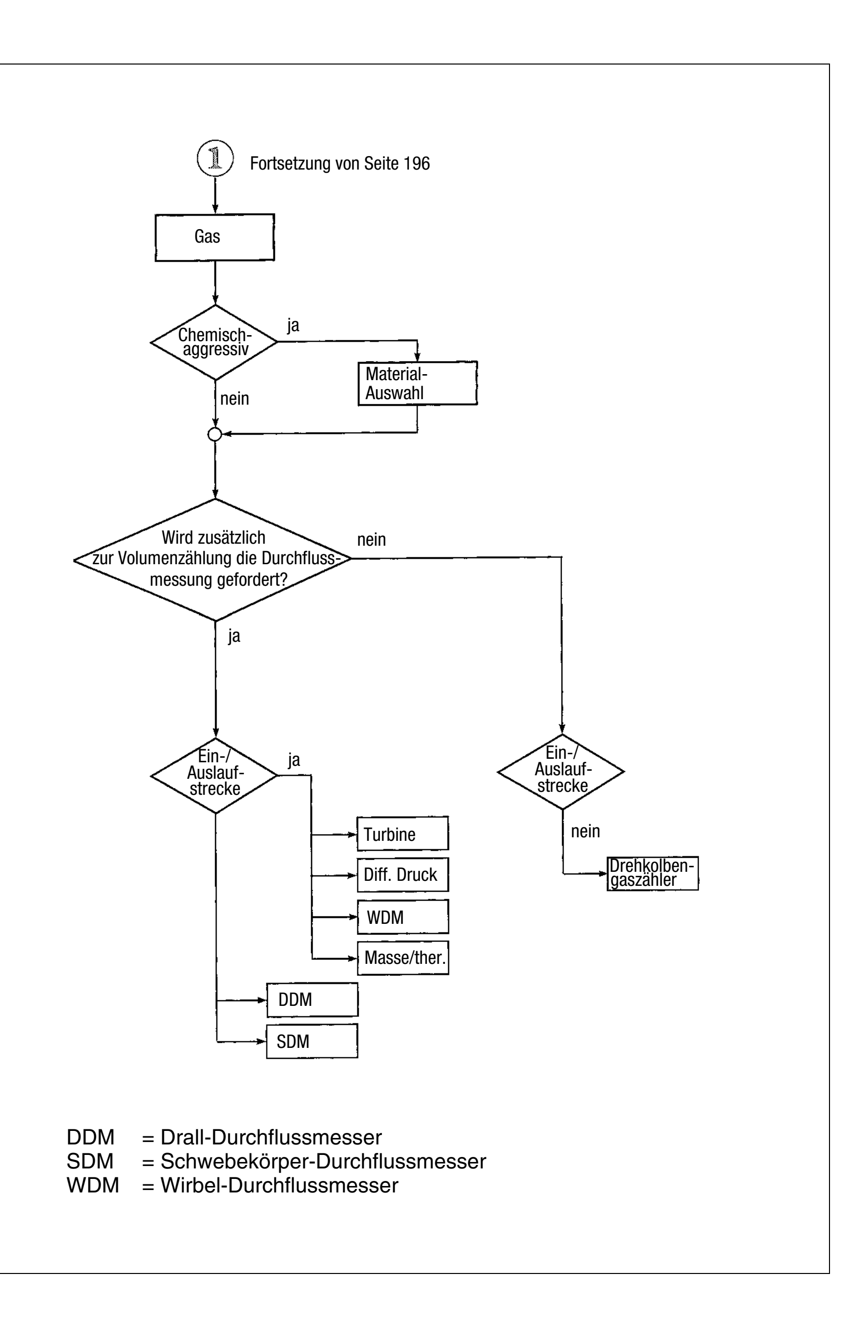
Natürlich ist es nicht möglich, den Rahmen dieser Arbeit so auszudehnen, dass sie allumfassend ist. Immer gibt es Spezialkonstruktionen für den Einsatzfall, und auch die hier festgehaltenen Größen und Werte werden sicher durch die rasante technische Weiterentwicklung überholt werden.

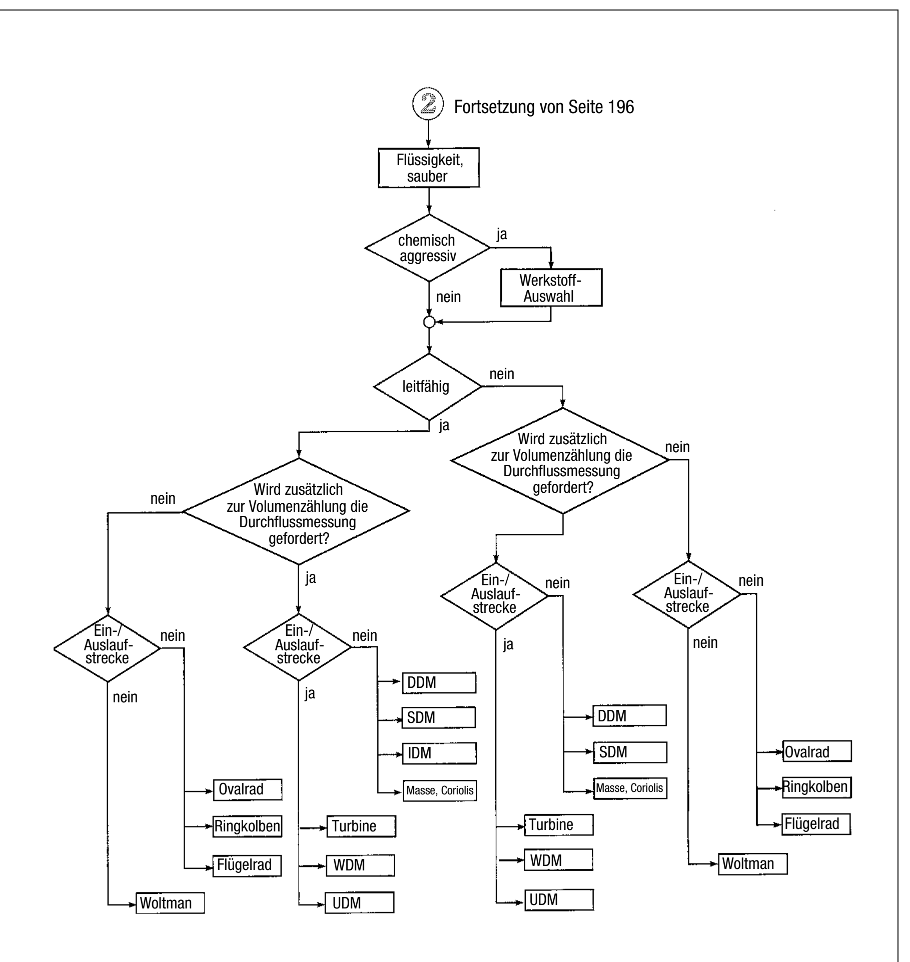
Leider entscheidet oft der Preis über Konstruktion und Fabrikat eines Messgerätes. Nebenkosten, z. B. für die Vorbereitung des Einsatzortes, für die Montage oder für die Wartung werden oft vergessen. Vielleicht spielen auch die Garantiebedingungen oder die Frage nach der Langzeitstabilität eine entscheidende Rolle bei der Geräteauswahl. Die nachstehenden Gegenüberstellungen sollen dabei Hilfestellung geben.

4.1 Geräte für die geschlossene Rohrleitung

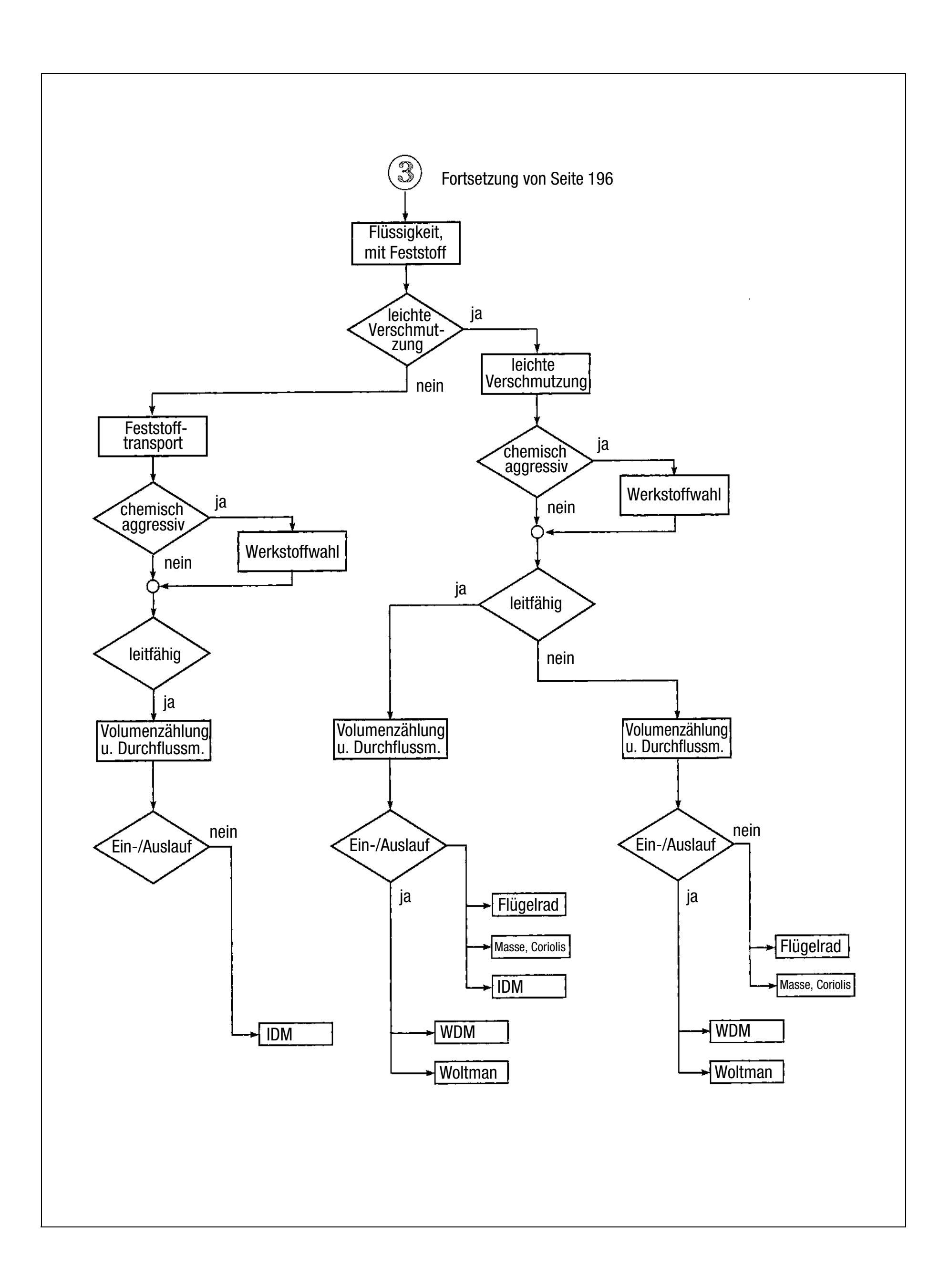
Flussdiagramme zur Geräteauswahl mit einigen wichtigen Auswahlkriterien:




1
Fortsetzung von Seite 196
Gas
Chemisch-aggressiv
ja
nein
Material-Auswahl
Wird zusätzlich zur Volumenzählung die Durchflussmessung gefordert?
nein
ja
Ein-/Auslauf-strecke
ja
Turbine
Diff. Druck
WDM
Masse/ther.
DDM
SDM
Ein-/Auslauf-strecke
nein
Drehkolben-gaszähler
DDM = Drall-Durchflussmesser
SDM = Schwebekörper-Durchflussmesser
WDM = Wirbel-Durchflussmesser



DDM = Drall-Durchflussmesser
IDM = Magnetisch-induktiver Durchflussmesser
SDM = Schwebekörper-Durchflussmesser
UDM = Ultraschall-Durchflussmesser
WDM = Wirbel-Durchflussmesser



3
Fortsetzung von Seite 196
Flüssigkeit,
mit Feststoff
leichte
Verschmut-
zung
ja
nein
leichte
Verschmutzung
Feststoff-
transport
chemisch
aggressiv
ja
nein
Werkstoffwahl
chemisch
aggressiv
ja
nein
Werkstoffwahl
leitfähig
ja
nein
leitfähig
ja
Volumenzählung
u. Durchflussm.
Volumenzählung
u. Durchflussm.
Volumenzählung
u. Durchflussm.
Ein-/Auslauf
nein
IDM
Ein-/Auslauf
ja
Flügelrad
Masse, Coriolis
IDM
WDM
Woltman
Ein-/Auslauf
nein
ja
Flügelrad
Masse, Coriolis
WDM
Woltman

4.1.1 Einfluss der Messstoffeigenschaften

An erster Stelle steht der Messstoff. Sein Volumen und sein Durchfluss sollen festgestellt werden. Bevor man eine Gerätetype bestimmt, analysiert man die Art des zu messenden Stoffes und dessen Eigenschaften. Für den Projektierenden ist damit schon eine wesentliche Arbeit getan.

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2"></th><th rowspan="2">Messstoff</th><th rowspan="2">Aggregat-zustand</th><th rowspan="2">Zähigkeits-ober-grenze [mPas]</th><th colspan="2">Feststoffe im Messgut</th><th rowspan="2">elektrische Leitfähig-keit</th><th rowspan="2">Gasanteile in der Flüssigkeit</th><th rowspan="2">Änderung von Druck, Dichte, Tempe-ratur</th><th rowspan="2">chemisch aggressiver Messstoff, Korrosions-gefahr</th></tr>
<tr><th>leicht ver-schmutzt</th><th>Feststoff-transport</th></tr>
<tr><td rowspan="6">Volumenzähler</td><td rowspan="3">ujnmittelbare</td><td>Ovalrad-zähler</td><td>F</td><td>$1 \cdot 10^5$</td><td rowspan="5">erhöhter Verschleiß,
Gefahr der Blockade</td><td>u</td><td>n</td><td>Fehler</td><td rowspan="6">geringe Fehler</td><td>Niro-Gehäuse
Niro-Räder
Kohle-Lager</td></tr>
<tr><td>Ringkolben-zähler</td><td>F</td><td>$2 \cdot 10^4$</td><td>u</td><td>n</td><td>Fehler</td><td>Niro-Gehäuse
PTFE-Kolben
Kohle-Lager
PTFE-Lager</td></tr>
<tr><td>Drehkolben-zähler</td><td>G</td><td>ohne Einfluss</td><td>u</td><td>n</td><td>–</td><td>Stahlguss-Gehäuse
Alu-, Stahl-, Guss-Kolben
Ölabdichtung</td></tr>
<tr><td rowspan="3">mittelbare</td><td>Flügelrad-zähler</td><td>F</td><td>5</td><td>u</td><td>n</td><td>Fehler</td><td>Kunststoff-Teile, Messing-gehäuse</td></tr>
<tr><td>Woltman-zähler</td><td>F</td><td>3</td><td>u</td><td>n</td><td>Fehler</td><td>Guss-Gehäuse, Kunststoff-Flügelrad, Niro-Teile</td></tr>
<tr><td>Turbinen-rad-zähler</td><td>F (G)</td><td>700</td><td>u</td><td>u</td><td>n</td><td>Gefahr des Über-drehens</td><td>Nickel-Rotor, Niro-Gehäuse, andere Teile Niro</td></tr>
<tr><td colspan="11">n = kein Einfluss
u = ungeeignet
F = flüssig
G = gasförmig
D = Dampf</td></tr>
</table>

Tab. 4-11: Einfluss der Messstoffeigenschaften

	Messstoff	Aggregatzustand	Zähigkeitsobergrenze [mPas]	Feststoffe im Messgut		elektrische Leitfähigkeit	Gasanteile in der Flüssigkeit	Änderung von Druck, Dichte, Temperatur	chemisch aggressiver Messstoff, Korrosionsgefahr
				leicht verschmutzt	Feststofftransport				
Durchflussmesser	Wirbel-Durchflussmesser	F, G, D	10	weitgehend unempfindlich gegen Verschmutzung	u	n	Kavitationseffekte möglich	Gasmessung mit Einfluss, Flüssigk.-messung ohne Auswirkung	Niro
	Drall-Durchflussmesser	F, G, D	5		u	n			Niro (Hastelloy, PTFE)
	Wirkdruckmessverfahren	F, G, D	siehe Tabelle 2.4	Beschädigung d. Messkante, Verstopf. des Wirkdruckanschlusses	u	n	Fehler	Einfluss auf Δp	Niro
	Schwebekörper-Durchflussmesser	F, G, D	100 (700)	Beschädigung der Messkante	u	n	Fehler	Dichte ändert Auftrieb	Niro, Hastelloy, PTFE, Glas
	Magnetisch induktiver Durchflussmesser	F	ohne Einfluss	n	n	$\geq$ 0,05 µs/cm	Fehler	n	PTFE, Platin
	Ultraschall-Durchflussmesser	F	Re-Einfluss	nur bei Doppler zulässig. Dämpfung bei Laufzeit	u	n	Fehler bei Doppler, Dämpfung bei Laufzeit	Schallgeschwindigkeit ändert sich bei Doppler	Niro, PTFE
	Masse-Durchflussmesser, Coriolis	F (G)	ohne Einfluss	eingeschränkt möglich	u	n	Fehler	Dichte ist Messgröße	Niro
	Masse-Durchflussmesser, thermisch	G	ohne Einfluss	weitgehend unempfindlich gegen Verschmutzung	u	n	–	n	Edelstahl, Hastelloy, Keramik

n = kein Einfluss
u = ungeeignet
F = flüssig
G = gasförmig
D = Dampf

Tab. 4-12: Einfluss der Messstoffeigenschaften

Einfluss der Zähigkeit

Die Zähigkeit oder Viskosität ist eine Stoffeigenschaft. Mit Hilfe der Reynoldschen Zahl gelingt es, den Viskositätseinfluss und die Dimensionen der Messstelle abzustimmen. Bei Re < 2300 herrscht laminare Strömung mit großem Viskositätseinfluss. Ein Übergangsbereich liegt etwa zwischen 2300 < Re < 3000, darüber tritt Turbulenz auf. Bei turbulenter Strömung gibt es keine Einschränkungen durch die Zähigkeit. Kleine Re-Werte haben, abhängig von der Messmethode, unterschiedliche Auswirkungen.

Bei der Gaszählung bzw. -durchflussmessung macht sich der Viskositätseinfluss kaum bemerkbar. Lediglich bei kleinen Schwebekörperdurchflussmessern mit leichten Schwebekörpern vergrößert sich im unteren Messbereich der Fehler geringfügig.

Anders sieht es bei Flüssigkeiten aus. Völlig viskositätsunabhängig arbeiten magnetisch-induktive und Masse-Durchflussmesser, wobei letztere, je nach Länge der Messstrecke, Druckverluste verzeichnen. Ultraschall-Durchflussmesser haben im Übergangsbereich von der laminaren zur turbulenten Strömung Schwierigkeiten.

Bei Wirbel-, Drall- und Turbinen-Durchflussmessern verschiebt die ansteigende Viskosität den Anfangsmesswert und engt damit die Messspanne ein.

Ovalrad- und Ringkolbenzähler sind die idealen Geräte für große Zähigkeiten. Mit der großen Viskosität werden sie wegen kleinerer Spaltverluste genauer.

Mit einer speziellen Formgebung des Schwebekörpers vermindert man den Einfluss bei diesem Durchflussmesser.

Feststoffe im Messgut

Feststoffe im Medium haben unterschiedliche Bedeutung. Da ist zuerst die meist ungewollte **Verschmutzung**, dann gibt es das Stoffgemisch, wie in Pasten und Breien, und schließlich den hydraulischen Feststofftransport. Unangenehm ist die Verschmutzung deshalb, weil der Umfang und die Auswirkung schlecht vorhergesagt werden können. Gase können Flüssigkeiten oder Staubpartikel mitführen. Festkörper im Gas sind schon deswegen gefährlich, weil die Fließgeschwindigkeiten beim Gastransport hoch sind und die kinetische Energie dieser Körper erheblich sein kann, so dass sie zerstörend wirken oder festhaftende **Ablagerungen** verursachen.

Der Drehkolbengaszähler geht davon aus, dass die Gase gefiltert sind. Für die Anfahrphase wird ein Sieb mit 0,1 bis 0,2 mm Maschenweite empfohlen. Außerdem kann eine Spüleinrichtung Schmutz entfernen. Bei Wirkdruck- und Schwebekörperdurchflussmessern zerstören Staubteilchen die empfindliche Messkante.

Verunreinigte Flüssigkeiten wirken sich durch erhöhten Verschleiß bei den drehenden Zählern aus. Im äußersten Fall verklemmen sich die rotierenden Teile. Wirbel- und Drall-Durchflussmesser schwemmen leichte Verschmutzungen durch das Gerät.

Verursacht im magnetisch-induktiven Durchflussmesser eine nichtleitende Ablagerung (Öl, Fett) die Isolation der galvanisch angekoppelten Elektroden, so muss der kapazitive Abgriff eingesetzt werden. Eine leitfähige Ablagerung etwa durch Magnetit erzeugt nur dann einen Fehler, wenn der Messstoff (hier Wasser) eine Leitfähigkeit von weniger als 100 µS/cm hat. Ansonsten ist der magnetisch-induktive Durchflussmesser das am wenigsten beeinflusste Gerät.

Ein Sonderfall ist der Ultraschall-Durchflussmesser, denn das Doppler-Prinzip benötigt einige Fremdkörper als Reflektoren, während das Laufzeitverfahren nur geringste Schmutzanteile zulässt und Gasblasen ausschließt. Ablagerungen beeinflussen die Schallstrecke und verursachen daher Fehlmessungen.

Voraussetzung für die einwandfreie Funktion des Masse-Durchflussmessers ist, dass die Feststoffpartikel den Schwingungen folgen, was wiederum von der Viskosität der Flüssigkeit abhängt. Also mit der größer werdenden Masse und damit der Trägheit des Teilchens wächst die Gefahr der Fehlmessung.

Hydraulischer Feststofftransport, wie z. B. bei Kohleschlamm oder Baggergut, verlangt einen Leitungsweg ohne Verengungen oder Einbauten. Dazu kommt erhöhter Verschleiß. Die Durchflussmessung in dieser Strecke ist nur mit dem magnetisch-induktiven Durchflussmesser möglich. Der Verschleiß lässt sich durch die richtige Auswahl der Werkstoffe für Auskleidung (PU, Weichgummi) und Elektroden (Hastelloy) minimieren. Die gesuchte Messgröße beim hydraulischen Feststofftransport ist meistens die Masse des bewegten Feststoffes. Deshalb kombiniert man den Volumendurchflussmesser mit einem Dichtemesser (Isotopen-Dichtemesser) und errechnet aus dem Produkt beider Größen den Massedurchfluss.

Unerwünschte Ablagerungen in Rohrleitungen werden durch Molchen beseitigt. Die Wirksamkeit des Molches hängt u. a. davon ab, dass der Rohrinnendurchmesser auf der gesamten Strecke nicht verändert wird. Der in der Leitung befindliche Durchflussmesser muss natürlich die gleichen Bedingungen erfüllen, d. h., Anpassung des Innendurchmessers ohne Stoßstellen. Nur magnetisch-induktive und Ultraschall-Durchflussmesser lassen sich individuell anpassen. Masse-Durchflussmesser mit geteilten Rohren können nicht gemolcht werden.

Gasanteile in der Flüssigkeit

Die zur Durchflussmessung bei Flüssigkeiten eingesetzten Geräte sind Volumendurchflussmesser, die nicht zwischen Gas und Flüssigkeit unterscheiden können. Deshalb verursachen Gaseinschlüsse Fehler von der Größenordnung ihres Volumenanteils. Vom Coriolis-Massedurchflussmesser sollte man eine richtige Messung erwarten. Aber auch hier entstehen Fehler durch die Dämpfungseigenschaften der Gase.

Unabhängig davon gibt es einige Nebenerscheinungen, die ebenfalls beachtet werden müssen. Bei Turbinendurchflussmessern besteht die Gefahr des Überdrehens durch größere Gasblasen. Kavitation entsteht leicht bei höheren Fließgeschwindigkeiten und das besonders bei Wirbel- und Dralldurchflussmessern. Im Ultraschall-Durchflussmesser nach der Laufzeit-Methode wird sowohl die Laufzeit als auch die Dämpfung verändert, so dass sich auch versteckte Gasbläschen bemerkbar machen. Schon bei 0,2 % Volumenanteil gibt es Fehlmessungen.

Korrosionsgefahr durch aggressive Messstoffe

Den Auswirkungen der **Korrosion** ist nur durch die richtige Wahl der verwendeten Werkstoffe beizukommen. Eine kleine Unaufmerksamkeit beispielsweise bei der Materialfestlegung für eine Dichtung kann das Messgerät funktionsunfähig machen.

Die komplizierten Bauteile der Volumenzähler sind bei der Werkstoffauswahl benachteiligt. Deshalb sind diese Geräte bei korrosiv wirkenden Messstoffen nicht beliebt. Flügelrad- und Woltmanzähler werden sowieso bevorzugt für die Wassermessung eingesetzt.

Die Durchflussmesser bieten mehr Werkstoffvielfalt. Allerdings muss bei der Wirkdruckmessung darauf geachtet werden, dass nicht nur die eigentliche Messblende, sondern auch Wirkdruckleitung und Armaturen resistent sein müssen. Unter Umständen verhindert das Spülen der Wirkdruckleitung mit einer Sperrflüssigkeit oder einem Gas das Eindringen der gefährlichen Stoffe.

Schwebekörper-Durchflussmesser aus Sonderwerkstoffen werden teuer und kommen daher selten zum Einsatz. Ähnliches gilt für Masse-Durchflussmesser.

Gute Problemlösungen bieten lediglich magnetisch-induktive und Ultraschall-Durchflussmesser. Das glatte Messrohr lässt sich resistent auskleiden zum Beispiel mit PTFE. Ultraschallsonden beim Ultraschall-Durchflussmesser und Elektroden beim magnetisch-induktiven Durchflussmesser haben den direkten Kontakt zum Messstoff, ragen also aus dem Rohr bzw. der Auskleidung heraus. Die Ultraschallsonde kann Niro- oder Hastelloy-Schutz bieten. Bessere Alternativen hat der magnetisch-induktive Durchflussmesser. Die Elektrodenwerkstoffe sind vielfältig. Sie reichen von Niro über Monel, Titan, Hastelloy und Platin bis zur Kohle.

4.1.2 Strömungstechnische Einflüsse

Das durch die Rohrleitung strömende Fluid hat Eigenschaften, die sein Strömungsverhalten besonders in Verbindung mit der Leitungsausbildung beeinflussen. Dem gegenüber steht die eingeschränkte Fähigkeit der Messgeräte, diese Einflüsse fehlerlos zu verarbeiten. Oder anders gesagt, es gibt Einschränkungen, die durch das **Geschwindigkeitsprofil** und die Reynoldsche Zahl Re gekennzeichnet sind.

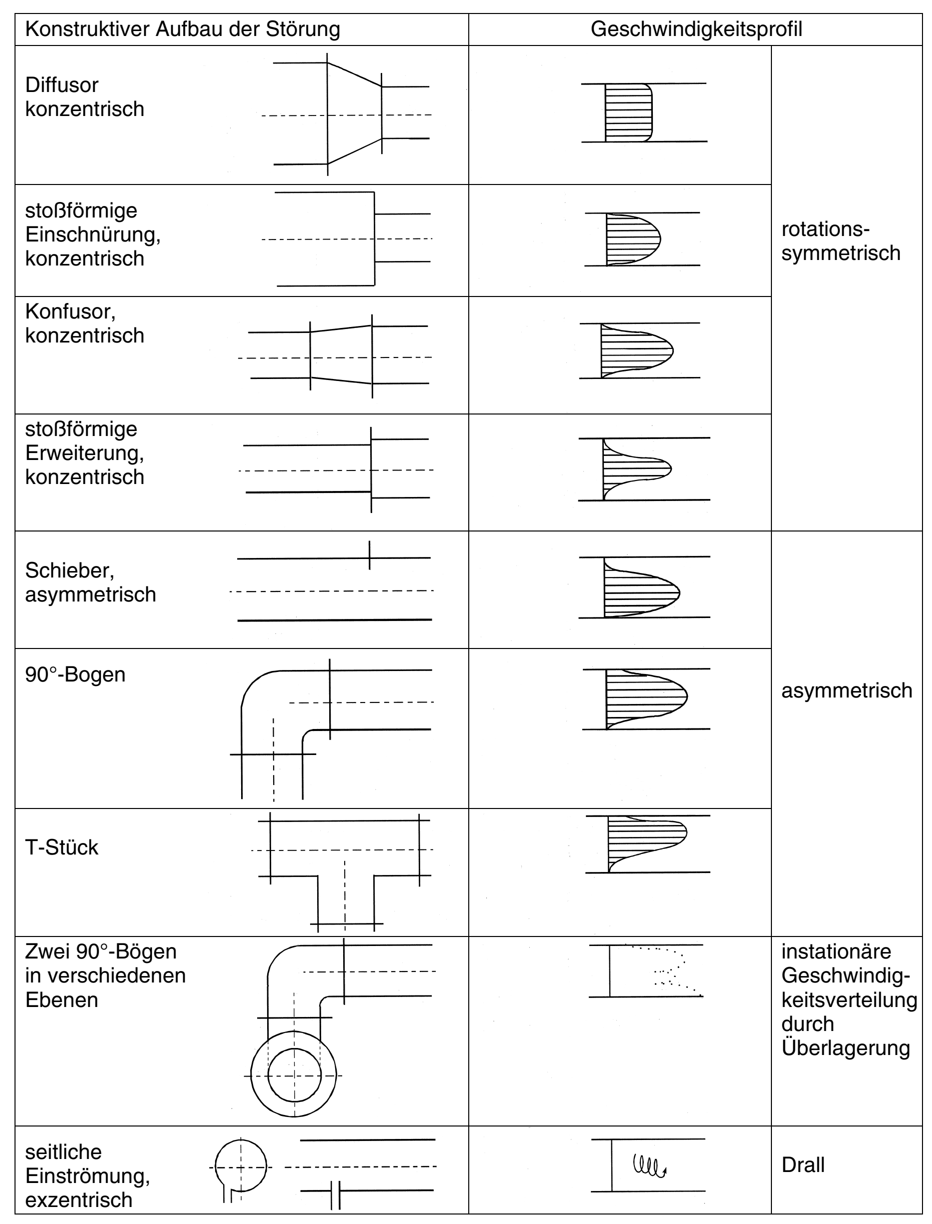
Die ideale Strömungsart ist die turbulente mit einem **rotationssymmetrischen Strömungsprofil**. (Das in Bild 1-2 zweidimensional dargestellte Geschwindigkeits-profil muss dreidimensional betrachtet werden). Alle Geräte arbeiten einwandfrei. Ähnlich verhalten sich die meisten Geräte bei rotationssymmetrischer laminarer Strömung mit der Einschränkung, dass die Messspannen der mittelbaren Volumenzähler, der Wirkdruckmesser und der Schwebekörper-Durchflussmesser mit steigender Viskosität verkleinert werden.

Am problemlosesten werden die Verdrängungszähler mit Strömungsunregelmäßigkeiten fertig. Und bei Stoffen mit niedriger Reynoldszahl Re arbeiten sie genauer.

	Messgeräte-Typ	Strömungsart			Beruhigungsstrecke		
		laminar	Über-gang	turbulent	Vorlauf	Nachlauf	stoßförm. Betrieb
unmittelbare	Ovalradzähler	n	n	n	n	n	Verschleiß
	Ringkolbenzähler	n	n	n	n	n	Verschleiß
	Drehkolbenzähler	n	n	n	n	n	Resonanz-gefahr
mittelbare Volumenähler	Flügelradzähler	n	n	n	n	n	n
	Woltmanzähler	n	n	n	5 x D	3 x D	n
	Turbinenradzähler	n	n	n	15 x D	5 x D	Übertourg. Verschleiß
	Wirbel-Durchflussmesser	u	u	n	15...25 x D	5 x D	n
	Drall-Durchflussmesser	u	u	n	3 x D	n	n
	Wirkdurck-Messverfahren	n	n	n	Tab. 2.5	Tab. 2.5	Fehler
Durchflussmesser	Schwebekörper-Durchflussmesser	n	n	n	n	n	Fehler
	Magnetisch-Induktiver Durchflussmesser	n	n	n	3 x D	2 x D	n
	Ultraschall-Durchflussmesser	n	u	n	wie bei Blenden Tab. 2.5	5 x D	n
	Masse-Durchflussmesser Coriolis	n	n	n	n	n	Fehler
	Masse-Durchflussmesser thermisch	n	n	n	15 x D	5 x D	n

n = kein Einfluss;
u = ungeeignnet
1 x D = Beruhigungsstrecke von 1xD Länge

Tab. 4-13: Strömungstechnische Einflüsse



Konstruktiver Aufbau der Störung	Geschwindigkeitsprofil	
Diffusor konzentrisch		rotations-symmetrisch
stoßförmige Einschnürung, konzentrisch		
Konfusor, konzentrisch		
stoßförmige Erweiterung, konzentrisch		
Schieber, asymmetrisch		asymmetrisch
90°-Bogen		
T-Stück		
Zwei 90°-Bögen in verschiedenen Ebenen		instationäre Geschwindigkeitsverteilung durch Überlagerung
seitliche Einströmung, exzentrisch		Drall

Tab. 4-14: Geschwindigkeitsverteilung in der Rohrleitung 1...2 x D hinter einem Störer bei turbulenter Strömung

Gestörte Strömungsprofile bei turbulenter Strömung müssen unabhängig von der Gerätetype unterschiedlich betrachtet werden. Tab. 4-14 zeigt einige Beispiele für Störungen und deren Auswirkungen auf die Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt. Den Verdrängungszählern bereiten derartige Veränderungen keine Schwierigkeiten. Das gleiche gilt für Schwebekörper- und Masse-Durchflussmesser nach dem Coriolis-Prinzip, auch für Drall-Durchflussmesser.

Die nach dem Wirkdruckverfahren arbeitenden Geräte reagieren sehr empfindlich auf Störungen. Deshalb sollen lange störungsfreie Rohrstrecken für eine Egalisierung sorgen (Tab. 2-5). Auch der Ultraschall-Durchflussmesser wird dann gestört, wenn der sehr enge Schallstrahl nicht alle Geschwindigkeitsveränderungen erfasst, was nur selten der Fall sein kann. Darum gelten ähnliche Vorschriften wie bei Wirkdruckmessern. Günstiger gestalten sich die Verhältnisse beim Ultraschall-Zweistrahlverfahren.

Die rotationssymmetrischen Strömungsprofile sind gutartige Störungen, die nach kurzen Beruhigungsstrecken ihren Einfluss verlieren. Die stoßförmigen Übergänge können allerdings noch Randwirbel mitführen. Die mittelbaren Zähler, magnetisch-induktive Durchflussmesser und Masse-Durchflussmesser, haben keine Probleme.

Anders sieht es bei den asymmetrischen Profilen aus. Die unmittelbaren Volumenzähler fordern 10...15 x D Beruhigungsstrecke (Beruhigungsstrecken sind gerade Rohrleitungsstücke mit dem gleichen Durchmesser wie der des Messgerätes. Mit Hilfe von Strömungsgleichrichtern lassen sich die Längen verkürzen), während der magnetisch-induktive Durchflussmesser mit 3...5 x D auskommt. Drall und Querwirbel pflanzen sich in geraden Rohrleitungen über große Entfernungen fort. Da ihr Einfluss auf die Messgenauigkeit beträchtlich ist, müssen Strömungsgleichrichter diese Wirkung verhindern.

Die in Tab. 4-13 aufgeführten Beruhigungsstrecken sollen den Messgeräten vorgeschaltet werden. Zusätzliche Strecken im Nachlauf der Geräte sollen dem zurückwirkenden Einfluss von Störern hinter dem Messgerät verhindern. Die Längen liegen zwischen 3 x D und 10 x D.

4.1.3 Einsatzspektrum, messortbezogene Grenzen

Der Einsatzort ist mitbestimmend für die Auswahl eines Messgerätes, denn die örtlichen Gegebenheiten lassen sich nur bedingt auf das Leistungsvermögen bestimmter Geräte einstellen.

Wenn z. B. Feststoffe hydraulisch transportiert werden, ist der Ringkolbenzähler nicht einsetzbar oder wenn für Gasmessungen ein magnetisch-induktiver Durchflussmesser verwendet werden soll, so scheitert das an der nicht vorhandenen elektrischen Leitfähigkeit.

Tab. 4-15 zeigt eine Anzahl von Kriterien, die durch die Messstelle vorgegeben sein können. Die Leistungsdaten in der Tabelle sind Firmendruckschriften entnommen. Es gibt sicher Gerätevarianten, deren Grenzdaten außerhalb der Tabellenwerte liegen.

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th></th><th>Nennweite DN</th><th>Einbaulage</th><th>max. zul. Messst.-Temperatur</th><th>höchste Druckstufe PN</th><th>Vibration</th><th>Pulsation</th><th>Verhalten bei Rückfluss</th><th>Hilfsenergie</th></tr>
<tr><td rowspan="8">Volumenzähler</td><td rowspan="3">unmittelbare</td><td>Ovalradzähler</td><td>6... 400</td><td>waagrecht</td><td>300 °C</td><td>100</td><td rowspan="6">verstärkter Verschleiß</td><td rowspan="2">geringer Einfluss</td><td rowspan="5">Rückwärtszählung</td><td rowspan="5">nicht erforderlich, nur bei Umformung und Messwertübertragung</td></tr>
<tr><td>Ringkolbenzähler</td><td>15... 800</td><td>beliebig</td><td>300 °C</td><td>100</td></tr>
<tr><td>Drehkolbenzähler</td><td>40... 300</td><td>waagrecht</td><td>40 °C</td><td>25</td><td>starker Einfluss</td></tr>
<tr><td rowspan="5">mittelbare</td><td>Flügelradzähler</td><td>15... 50</td><td>waagrecht (senkrecht)</td><td>130 °C</td><td>16</td><td rowspan="3">Einfluss</td></tr>
<tr><td>Woltmanzähler</td><td>40... 400</td><td>waagrecht; senkrecht</td><td>130 °C</td><td>40</td></tr>
<tr><td>Turbinenradzähler</td><td>5... 600</td><td>waagrecht (senkrecht)</td><td>250 °C</td><td>100</td><td rowspan="5">keine definierte Messung</td><td rowspan="4">zur Versorgung der Messumformer</td></tr>
<tr><td>Wirbel-Durchflussmesser</td><td>25... 250</td><td>beliebig</td><td>400 °C</td><td>100</td><td>Einfluss*)</td><td rowspan="2">wenig Einfluss</td></tr>
<tr><td>Drall-Durchflussmesser</td><td>15... 400</td><td>beliebig</td><td>280 °C</td><td>100</td><td>Einfluss*)</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="6">Durchflussmesser</td><td>Wirkdruck-Messverfahren</td><td><50...2000</td><td>beliebig</td><td>1000 °C</td><td>630</td><td>wenig Einfluss</td><td>wenig Einfluss</td></tr>
<tr><td>Schwebekörper-Durchflussmesser</td><td>3... 100</td><td>beliebig</td><td>360 °C</td><td>250</td><td>starker Einfluss</td><td>starker Einfluss</td><td>wie bei Zählern</td></tr>
<tr><td>Magn.-induktive Durchflussmesser</td><td>1...3000</td><td>beliebig</td><td>180 °C</td><td>250</td><td rowspan="2">kein Einfluss</td><td>kein Einfluss</td><td>kompl. Messung bei Rückfluss</td><td rowspan="4">erforderlich</td></tr>
<tr><td>Ultraschall-Durchflussmesser</td><td>10...3000</td><td>beliebig</td><td>200 °C</td><td>100</td><td>geringer Einfluss</td><td>Messung möglich</td></tr>
<tr><td>Masse-Durchflussmesser, Coriolis</td><td>1,5... 150</td><td>beliebig</td><td>180 °C</td><td>100</td><td>Einfluss</td><td>kaum Einfluss</td><td>kompl. Messung bei Rückfluss</td></tr>
<tr><td>Masse-Durchflussmesser, thermisch</td><td>25...3000</td><td>beliebig</td><td>300 °C</td><td>40</td><td>kein Einfluss</td><td>wenig Einfluss</td><td>Messung möglich</td></tr>
<tr><td colspan="11">*) Kompensation bei Vortex</td></tr>
</table>

Tab. 4-15: Einsatzspektrum

Druck und Temperatur

Gehäusefestigkeit durch Wandstärke und Werkstoffauswahl, mechanische Toleranzen bei Wärmeausdehnung, Dichtungsart und Dichtungsmaterial, Grenzwerte der Fühlerelemente und der Einfluss auf die Übertragungsorgane. Das sind einige Gesichtspunkte, die bei extremen Druck- und Temperaturbelastungen die Geräteauswahl beeinflussen. Beim Schwebekörper-Durchflussmesser unterscheidet man die Geräte mit Glasmessrohr und die mit Metallmessrohr. Die Druck- und Temperaturgrenzen der Glas-Konstruktionen liegen natürlich weit unter denen der Metallausführung.

Die Wirkdruckmessung schließt Armaturen, Wirkdruckleitung und Messumformer ein. Diese Teile müssen entsprechend ausgelegt werden. Die Grenzdaten des Messumformers entscheiden schließlich über das gesamte System. Da die Temperaturobergrenze der Messumformer bei etwa 120 °C liegt, müssen höhere Temperaturen durch Vorlagen in der Wirkdruckleitung reduziert werden.

Vibration

Vibrationen der Rohrleitung verursachen vor allem an den beweglichen Teilen der Volumenzähler und deren Lagerstellen einen größeren Verschleiß. In den schwingenden Konstruktionselementen von Wirbel- und Massedurchflussmessern überlagern sich Mess- und Vibrationsfrequenzen und führen zu Fehlmessungen. Bei Resonanz kann es sogar zu Brüchen kommen. Der Wirbel-Durchflussmesser Vortex von **ABB** ist wegen der Trennung von Störkörper und Messfühler und wegen der Schwingungskompensation im Messfühler weitgehend unempfindlich gegen Vibrationen.

Der Masse-Durchflussmesser FCM2000 misst auf Grund seines S-förmigen Doppelrohrsystems Differenzsignale, die prinzipiell von äußeren Schwingungen entkoppelt sind. Zusätzlich durch seine digitale Filtertechnik ist er damit weitgehend unempfindlich gegen äußere Vibrationen. Sollten Vibrationen direkt auf die Erregerfrequenz treffen, so kann die Messung beeinflusst werden.

Die relativ große Masse des Schwebekörpers macht dieses Gerät empfänglich gegenüber Vibrationen. Deshalb sollte man Schwingungsdämpfer einschalten und Wandbefestigung vorsehen.

Pulsation

Der Einfluss von Pulsationen hängt von der Trägheit des Messsystems ab. Nur solange das Messorgan der pulsierenden Änderung verzögerungsfrei folgen kann, ist die Einwirkung unbedeutend.

Die mit beweglichen Teilen ausgerüsteten Messgeräte sind zwangsläufig einem verstärkten Verschleiß ausgesetzt. Deshalb muß unbedingt für eine Dämpfungseinrichtung gesorgt werden. Ovalrad- und Ringkolbenzähler besitzen soviel Trägheit, dass eine gewisse Eigendämpfung zur Mittelwertbildung ausreicht. Der Messfehler wird sich etwas vergrößern.

Unter Kapitel 2.1.3 war bereits auf die Gefahren der Pulsation beim Drehkolbenzähler hingewiesen worden. Turbinen-, Wirbel- und Drall-Durchflussmesser erfassen den Messwert nahezu trägheitslos, haben aber in den nachgeschalteten Messumformern Zeitglieder. Es kommt wieder zur Mittelwertbildung mit leicht vergrößertem Fehler. Turbinenzähler, die Gase messen, sind dann gefährdet, wenn ihre Drehzahl zu schnell ansteigt und beim Übertouren die Lager stärker verschleißen.

Bedingt durch das nichtlineare Verhältnis von Wirkdruck und Durchfluss verändert sich auch der durch Pulsation verursachte Fehler bei der Wirkdruckmessung unlinear. Deshalb ist eine Dämpfung unbedingt zu empfehlen, und zwar am besten durch Speichergefäße oder Windkessel in der Messstoffleitung. Mit Hilfe der Hodgson-Zahl lassen sich entsprechende Volumina berechnen. Kleinere Pulsationen verarbeiten aber auch die Wirkdruckmessumformer durch Dämpfungsglieder.

Der Schwebekörper neigt bei Pulsation zum Tanzen. Deshalb muß auch hier gedämpft werden. Metallkonusdurchflussmesser lassen sich mit Dämpfungsgliedern ausrüsten.

Rückflussmessung

Die extreme Form der Pulsation führt zum **Rückfluss**. Manche Rohrleitungen werden aber auch bewusst in beiden Fließrichtungen betrieben. Gibt es Messgeräte, die auch bei Rückfluss arbeiten?

Die unmittelbaren Zähler können selbstverständlich ihre Drehrichtung umkehren und rückwärts zählen, wenn sie sekundärseitig darauf vorbereitet sind. Am besten geeignet und auch eingestellt sind magnetisch-induktive und Masse-Durchflussmesser, die sämtliche Messwerte für beide Fließrichtungen liefern und sich automatisch umschalten.

Hilfsenergie

Die Mess- und Regeltechnik arbeitet mit Messsignalen, die über große Entfernungen weitergeleitet werden müssen. Deshalb liefern alle Mengen- und Durchflussmesser entsprechende Ausgangsgrößen, zu deren Erzeugung elektrische Hilfsenergie benötigt wird. Die Durchflussmesser brauchen zudem die Hilfsenergie zur Eigenversorgung.

Zur ausschließlich örtlichen Anzeige kann man auf die Installation elektrischer Zuleitungen bei Zählern und beim Schwebekörper-Durchflussmesser verzichten.

In sehr wenigen Fällen arbeitet man mit pneumatischen Einheitssignalen 0,2 bis 1 bar. Dazu müssen die Messgeräte mit entsprechenden Messumformern ausgerüstet sein, denen als Hilfsenergie Druckluft von 1,4 bar zugeführt wird. Pneumatische Messumformer gibt es in Wirkdruckmessgeräten und Schwebekörper-Durchflussmessern.

Erdung für magnetisch-induktive Durchflussmesser

Die Erdung nach VDE 0100 ist aus Sicherheitsgründen sowie für die einwandfreie Funktion des Durchflussaufnehmers wichtig. Das an den Elektroden abgegriffene Messsignal beträgt nur einige Millivolt und kann von vagabundierenden Erdströmen, die über die Messstrecke fließen und eine bestimmte Größe überschreiten, beeinflusst werden. Die Erdungsschrauben des Aufnehmers sind entsprechend VDE 0100, Teil 540, auf Funktionserdepotential (bei EX-Ausführung nach VDE 0165 auf Potentialausgleich, PA) zu bringen. Aus messtechnischen Gründen sollte dies möglichst identisch mit dem Messstoffpotential sein. Eine zusätzliche Erdung über die Anschlussklemmen (Hilfsenergie) ist nicht erforderlich. Bei Kunststoffleitungen bzw. isoliert ausgekleideten Rohrleitungen erfolgt die Erdung über **eine** Erdungsscheibe oder Erdungselektroden. Wenn die Rohrstrecke nicht frei von vagabundierenden Fremdstörspannungen ist, empfehlen wir je eine Erdungsscheibe **vor** und **hinter** dem Durchflussmesser einzusetzen.

Erdungselektroden werden eingesetzt, wenn preisliche Vorteile den Ausschlag geben und wenn keine vagabundierenden Fremdstörspannungen vorhanden sind. **Achtung**, nicht alle Geräteausführungen können mit Erdungselektroden spezifiziert werden.

Eine Erdungsscheibe wird eingesetzt, wenn Kunststoffleitungen oder isolierte Rohrleitungen vorhanden sind und bei den Geräteausführungen, die nicht mit Erdungselektroden geliefert werden können.

Zwei Erdungsscheiben werden eingesetzt, bei isoliert ausgekleideten Rohrleitungen und wenn vagabundierende Fremdstörspannungen in der Rohrleitung auftreten können. Auch bei Kathodenschutz, wenn der Durchflussaufnehmer isoliert in der Rohrleitung eingebaut wurde und das Kathodenpotential umgeleitet wurde.

4.1.4 Leistungsvermögen und Eigenschaften der Messgeräte

Darstellung in Tab. 4-16 Leistungsvermögen der Messgeräte:

	Messgeräte-Typ	Messpanne	Fehlergrenze in % vom Messwert	dyn. Verhalten, Zeitkonstante [s]	Druckverlust bei q_{vmax} [bar]
unmittelbare Volumenzähler	Ovalradzähler	1:2...1:10	0,1...0,3		4
	Ringkolbenzähler	1:5...1:250	0,2...2		3
	Drehkolbenzähler	1:20 (1:50)	1		0,03
mittelbare Volumenzähler	Flügelradzähler	1:100...1:350	2...3		0,25...0,75
	Woltmanzähler	1:100...1:12500	2...3		0,005...0,5
	Turbinenradzähler	1:5...1:20	0,5 (Flüssigk.) 1 (Gas)		0,5...1
	Wirbel-Durchflussmesser	1:15...1:20	0,75 (Flüssigk.) 1 (Gas)	0,2	0,7 (Wasser) 0,07 (Luft)
	Drall-Durchflussmesser	1:10...1:25	0,5	0,2	0,3 (Wasser) 0,05 (Luft)
Durchflussmesser	Wirkdruck-Messverfahren	1:5 (1:10)	2		0,005...1 abh. von Wirkdruck- und Öffnungsverhältnis
	Schwebekörper-Durchflussmesser	1:12	Klasse 1,6/2,5		0,005...0,2
	Magn.-induktiver Durchflussmesser	1:50	0,25	0,2	wie Rohrleitung
	Ultraschall-Durchflussmesser	1:10	1	1	wie Rohrleitung
	Masse-Durchflussmesser, Coriolis	1:100	0,15	0,2	1
	Masse-Durchflussmesser, thermisch	1:40...1:150	1	0,012	0,002

Tab. 4-16: Leistungsvermögen

	Messgeräte-Typ	bewegliche Teile	Verschleiß, Verschleiß-teile	Werkstoffwahl der messstoff-berührten Teile	Reinig., Sterili-sation
unmittelbare Volumenzähler	Ovalradzähler	Ovalräder, Getriebe	Lager, Zähnung	Ovalräder und Gehäuse aus Grauguss, Niro, Bronze, Lager aus Hartkohle, Niro	–
	Ringkolbenzähler	Ringkolben, Getriebe	Lager, Ringkolben	Gehäuse u. Messkammer aus Grauguss, Niro, Bronze, Duro-plast, Ringkolben aus Grauguss, Hartgummi, Kohle, PCTFE, Tan-tal, Kunststoff	+
	Drehkolbenzähler	Drehkolben, Getriebe	Lager, Drehkolben	Kolben und Gehäuse aus Alu-Legierung oder Grauguss, Lager aus Niro	–
mittelbare Volumenzähler	Flügelradzähler	Flügelrad, Getriebe	Lager	Gehäuse aus Messing, Messeinsatz aus Kunststoff, Achsen aus Niro	–
	Woltmanzähler	Flügelrad, Getriebe	Lager	Gehäuse aus Grau- oder Sphäro-guss, Flügelrad und Messeinsatz aus Kunststoff, Messing, Niro	–
	Turbinenradzähler	Rotor	Lager	Rotor und Gehäuse aus Niro, Lager aus Saphir, Wolframkarbid	–
	Wirbel-Durchfluss-messer	keine	kaum Verschleiß	Niro (1.4571)	+
	Drall-Durchfluss-messer	keine		Gehäuse aus Niro (1.4571); Leitkörper aus 1.4571, Hastelloy C; Fühlerschutz aus 1.4571, Hastelloy C	+
Durchflussmesser	Wirkdruck-Messverfahren	keine	Mess-kanten	Niro (1.4571)	
	Schwebekörper-Durchflussmesser	Schwebe-körper	Mess-kanten	Niro (1.4571), Hastelloy C, PTFE, PVDF, Glas	+
	Magn.-induktiver Durchflussmesser	keine	kaum Verschleiß	Auskleidung aus Hart-, Weich-gummi, PFA, PTFE, Elektroden aus 1.4571, Hastelloy, Tantal, Platin, Kohle	++
	Ultraschall-Durchflussmesser	keine		Niro (1.4571), Hastelloy C	++
	Masse-Durchfluss-messer, Coriolis	keine		Niro (1.4571), Hastelloy C, 1.4435	+
	Masse-Durchfluss-messer, thermisch	keine		Edelstahl, Hastelloy C, Keramik	++

Tab. 4-17: Fortsetzung Leistungsvermögen

Messgeräte-Typ		Messwertanzeige und Messwertübertragung								
		Örtl. Anzeiger	Grenzkontakt	Stromausgang	2-Ltr.-Technik	Impuls	Schnittstelle	HART	Ex-Schutz	Eichzulassung
unmittelbare Volumenzähler	Ovalradzähler	ja	ja	n	n	ja	n	n	nicht erford.	Flüssigkeiten
	Ringkolbenzähler	ja	n	n	n	ja (Ex)	n	n	nicht erford.	Flüssigkeiten
	Drehkolbenzähler	ja	ja	n	n	ja	n	n	nicht erford.	Gase
mittelbare Volumenzähler	Flügelradzähler	ja	n	n	n	ja	n	n	nicht erford.	Wasser
	Woltmanzähler	ja	n	n	n	ja	n	n	nicht erford.	Wasser
	Turbinenradzähler	n	n	n	n	ja	n	n	ja	Flüssigk., Gase
	Wirbel-Durchflussmesser	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	n
	Drall-Durchflussmesser	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	n
Durchflussmesser	Wirkdruck-Messverfahren	ja	n	ja	ja	n	n	ja	ja	n
	Schwebekörper-Durchflussmesser	ja	ja	ja	n	ja	ja	ja	ja	n
	Magn.-induktiver Durchflussmesser	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	Wasser, Lebensm.
	Ultraschall-Durchflussmesser	ja	n	ja	n	n	n	n	ja	Heizwasser
	Masse-Durchflussmesser, Coriolis	ja	ja	ja	n	ja	ja	ja	ja	n
	Masse-Durchflussmesser, thermisch	ja	ja	ja	n	ja	ja	ja	ja	n

Tab. 4-18: Fortsetzung Leistungsvermögen

Messspanne

Die Messspanne der Ovalrad- und Ringkolbenzähler hängt von der Viskosität des Messstoffes ab. Sie hat das Verhältnis 1:10 bei Viskositäten bis etwa 300 mPas und steigt an auf 1:20 bei $1 \cdot 10^4$ mPas. Gerade umgekehrt liegen die Verhältnisse bei den mittelbaren Zählern und Durchflussmessern. Mit steigender Viskosität steigt auch der lineare Anfangswert der Messung und verkleinert damit die Messspanne.

Wegen des quadratischen Verhältnisses zwischen Messgröße Differenzdruck und Durchfluss hängt die Messspanne beim Wirkdruckverfahren von der geforderten Genauigkeit ab. Die Spanne 1:3 verspricht eine sehr gute Genauigkeit.

Magnetisch-induktive und Ultraschall-Durchflussmesser nehmen insofern eine Sonderstellung ein, weil bei ihnen die Bereichsendwerte eingestellt und somit optimiert werden können. Thermische Masse-Durchflussmesser erreichen eine Messspanne bis 1:150.

Fehlergrenzen

Eine strittige Angabe ist die der Fehlergrenzen, weil sie von den Geräteherstellern für den Idealfall der Rahmenbedingungen angegeben werden. In der Praxis gibt es häufig Abweichungen vom Idealfall, so dass an die Genauigkeit des Messgerätes Zugeständnisse gemacht werden müssen. Wichtig ist auch der Hinweis, dass der Fehler einmal auf den Sollwert (Messwert) und einmal auf den Messbereichsendwert bezogen wird. In den Richtlinien VDI/VDE 2600 (4) werden Fehlerarten, Bezugsgrößen und Fehlverhalten definiert.

Durch spezielle Kalibrierungen erzielt man verbesserte Genauigkeiten, die dann aber meist nur für einen begrenzten Zeitraum gelten. Wie überhaupt die Fehlergrenzen durch Verschmutzung, Verschleiß und durch Änderung der physikalischen Größen beeinflusst werden können.

Die in der Tabelle angegebenen Werte sind messwertbezogene Fehler. Davon ausgenommen sind die Angaben zum Schwebekörper-Durchflussmesser, denn in VDI/VDE 3513 Blatt 2 wurden Genauigkeitsklassen geschaffen, die aus einer Kombination von messwertbezogenen und endwertbezogenen Fehlern bestehen. 75 % der als Genauigkeitsklasse angegebenen Zahl ist der Fehler in Prozent vom Messwert und 25 % der vom Skalenendwert.

Die Summe beider Größen ergibt die Genauigkeitsklasse **1 - 2,6 - 2,5 - 4 - 6 - 10.**

Dynamisches Verhalten

Mit dem Begriff Zeitverhalten beurteilt man den zeitlichen Ablauf der Ausgangsgröße eines Messgerätes nach einer sprungförmigen Änderung des Messwertes (Sprungantwort). Die Kenngrößen sind die Zeitkonstante T (auch τ) und die Einstellzeit T_a. Bei einem Sprung des Messwertes liegt die Anzeige nach der Zeit T bei 63 % des Sollwertes. Zum Zeitpunkt $5 \cdot T$, das entspricht der Einstellzeit T_a, beträgt der Anzeigewert nahezu 100 %.

Für die Zähler gibt es kaum Angaben über das Zeitverhalten, denn die zu bewegenden Massen und die Viskositäten der Fluide sind unterschiedlich. Für Schwebekörper-Durchflussmesser gelten gleiche Bedingungen, und beim Wirkdruckverfahren verändern Wirkdruckleitung mit unterschiedlichen Armaturen das Zeitverhalten.

Verschleiß

Verständlicherweise ist eine wichtige Forderung der Anwender die Langzeitsicherheit der Messung. Deshalb muss der mechanische Verschleiß klein gehalten werden.

Verschleiß wird vor allem durch Abrieb an den Messelementen (durch den Messstoff) und durch Lagerreibung sich bewegender Teile verursacht. Als ideales Messgerät kann man den magnetisch-induktiven Durchflussmesser ansehen, dessen glatte Rohrinnenwand nur dann Verschleiß zeigt, wenn stark abrasive Messstoffe, wie etwa Kalkmilch, Sand-Wasser-Gemisch oder Kohle-Wasser-Gemisch bei hydraulischem Feststofftransport, erfasst werden. Werden die Wandungen mit Polyurethan oder Weichgummi beschichtet, so bereiten selbst diese Messstoffe kaum Schwierigkeiten.

Wirbel, Drall- und thermische Masse-Durchflussmesser haben zwar keine beweglichen Teile aber solche, die in die Messstrecke hineinragen. Feststoffteilchen im Messstoff dürfen eine bestimmte Größe, Härte und Kantenschärfe nicht überschreiten. Geringe Staubanteile in den Gasen oder Kunststoffsuspensionen sind durchaus zulässig.

Bei der Blendenmessung muss die Messkante scharf bleiben, denn schon geringe Veränderungen verursachen Messfehler. Deshalb kann man bei geringem Feststoffanteil im Messstoff äußersten Falles eine Düse einsetzen. Schwierigkeiten bereiten dann trotzdem die Wirkdruckanschlüsse, die sich zusetzen können. Die Messkante am Schwebekörper ist ebenfalls präzise gefertigt, auch hier darf es nicht zur Beschädigung kommen.

Zu den letztgenannten Schwierigkeiten kommt der Lagerverschleiß bei den Zählern mit ihren drehenden Messkörpern hinzu. Kleinste Anteile von Festkörpern im Messstoff können diese Geräte zerstören. Ideal sind hier Messstoffe, die eine gewisse Schmierfähigkeit besitzen.

Werkstoffe

Werkstoffauswahl bedeutet immer Klärung der Korrosionsprobleme. Manche Messstoffe sind chemisch harmlos, werden aber auch durch geringe Anteile anderer Stoffe, vielleicht nur Verschmutzungen, aggressiv. Deshalb ist Sorgfalt angesagt. Die Vielfalt der möglichen Werkstoffe ist besonders dort eingeschränkt, wo komplizierte und schwierig herzustellende Teile benötigt werden. Das trifft vor allem die Volumenzähler oder teilweise auch Drall-, Wirbel- und thermische Masse-Durchflussmesser.

Die Wirkdruckmessung erscheint auf den ersten Blick problemlos. Es ist aber nicht nur die Blendenscheibe oder die Düse aus einem edlen Werkstoff zu fertigen. Auch Wirkdruckleitung, Armaturen und Wirkdruckumformer müssen auf den Messstoff abgestimmt werden. Manchmal hilft man sich durch ständiges Spülen der Wirkdruckleitung.

Jetzt wird's eine Preisfrage. Diese stellt sich dann auch bei Schwebekörper-Durchflussmessern aus edlem Material. Sie werden nur dann eingesetzt, wenn an der Messstelle keine Hilfsenergie zur Verfügung steht. Fast ideal ist das Werkstoffproblem beim magnetisch-induktiven Durchflussmesser gelöst, denn PTFE-Auskleidung lässt sich bei fast allen Flüssigkeiten verwenden. Als Elektrodenwerkstoff ist Platin herausragend gut. Möglicherweise löst man die Frage des Elektrodenwerkstoffes durch den kapazitiven Signalabgriff.

Der Ultraschall-Durchflussmesser benötigt das richtige Schutzrohr für den Schallwandler (Sender/Empfänger).

Reinigung, Sterilisation

Warum muss eine geschlossene Rohrleitung gereinigt werden? Dafür gibt es mehrere Gründe: Ablagerungen durch Sedimentation oder durch Adhäsion verengen den Querschnitt, Kristallbildung blockiert den Durchfluss, zurückgebliebene Reste verunreinigen das Produkt. Die Möglichkeit der Reinigung entscheidet bei der Auswahl des Messgerätes.

Dort wo Ablagerungen zu befürchten sind, lassen sich Geräte mit bewegten Teilen nur selten verwenden. Aber auch Einbauten, wie bei Drall-, Wirbel,- und thermischen Masse-Durchflussmessern lassen Schwierigkeiten erwarten. Beim Ultraschall-Durchflussmesser verändert sich die Schallstrecke, so dass es zu Fehlmessungen kommt. Den magnetisch-induktiven Durchflussmesser stört nur eine nichtleitende Ablagerung, und dann schafft es das gleiche Gerät mit kapazitivem Signalabgriff. Elektrisch leitfähige Ablagerungen schließen das Messsignal kurz und verursachen dadurch Fehlmessungen.

Ablagerungen entfernt man durch spülen, lösen oder durch mechanische Reinigung mittels Bürste oder Molch. Der freie Querschnitt bleibt bei dieser Arbeitsweise ein großer Vorteil. Der Molch verlangt sogar eine Rohrleitung mit definiertem Durchmesser ohne Stoßstellen. Diese Forderung lässt sich nur mit dem magnetisch-induktiven Durchflussmesser erfüllen, vielleicht auch mit dem Ultraschall-Durchflussmesser. Zu den in der Leitung verbleibenden Resten zählen vor allem Bakterien, die in der Lebensmittelindustrie das Produkt verderben. Gründliche Reinigung und Sterilisation durch Dampf, flüssige Reinigungsmittel, Säuren und Laugen ist deshalb unumgänglich. Das geschieht in der Regel im **CIP-**(cleaning in place) **und SIP-**(sterilisation in place) **Verfahren**, bei dem alle Anlagenteile in der Leitung verbleiben. Die CIP-Fähigkeit wird durch Versuche ermittelt. Zertifikate für Schwebekörper-, magnetisch-induktive, thermische Masse-Durchflussmesser und Coriolis-Masse-Durchflussmesser liegen vor. Der Ringkolbenzähler muss zur Reinigung demontiert werden.

4.1.5 Montage und Wartung

Der Anwender einer Messung wünscht sich den problemlosen Einbau des Messgerätes und will danach nur noch die exakten Messergebnisse sehen, das Gerät selbst interessiert nicht mehr. Wenn auch die moderne Technik diesem Ziel schon sehr stark nahe kommt, so sollten doch regelmäßige Kontrollen Ausfälle vermeiden. Deshalb gehört zur Auswahl eines Gerätes auch die Frage nach der Eignung des Wartungspersonals.

Der Einbau des Messgerätes in die Rohrleitung geschieht mit Flansch- oder Gewindeverbindungen unter Berücksichtigung der Beruhigungsstrecken, z. B. Wirbel- und thermische Masse-Durchflussmesser, noch relativ problemlos. Allerdings steht an dieser Stelle teilweise die Forderung nach spannungsfreier Montage, denn sehr oft werden vorhandene Rohrleitungsspannungen im Messgerät aufgefangen. Zwischenflanschmontage (sand witch) verlangt eine exakte Zentrierung. Es gibt Ultraschall-Durchflussmesser, deren Messelemente (Sender/Empfänger) in die Wand der Rohrleitung eingeschweißt werden. Diese Methode liefert nur dann einwandfreie Messergebnisse, wenn durch örtliche Kalibrierung die Geometrie der Rohrleitung Berücksichtigung findet.

Bei Zählern und Schwebekörper-Durchflussmessern, die ohne Hilfsenergie arbeiten, sind mit der Montage die wesentlichen Arbeiten abgeschlossen. Wenn bei anderen Geräten Hilfsenergie gefordert ist, muss sie herangeführt und installiert werden. Aufnehmer und getrennte Messumformer kommunizieren mit schwachen störempfindlichen Signalen. Deshalb verlegt man abgeschirmte Spezialkabel. Kompaktgeräte umgehen diesen Aufwand.

Einen großen Montageaufwand beansprucht die Wirkdruckmessung. Wirkdruckleitungen und verschiedene Armaturen müssen montiert und befestigt werden. Der Differenzdruckmessumformer benötigt Hilfsenergie.

Alle Geräte sind heute so konzipiert, dass das Wartungspersonal die Funktionstreue direkt oder nach einem einfachen Test erkennen kann. Etliche Geräte überwachen sich selbst und melden Fehler.

Den Verschleiß an Lagerstellen und Messorganen der drehenden Zähler kann man allerdings immer noch am besten visuell erkennen. Deshalb sind diese Zähler auch so gebaut, dass sie am Messort geöffnet werden können.

Der Einbau des IDM hat axialsymmetrisch zu erfolgen. Der IDM muss immer mit der zu messenden Flüssigkeit gefüllt sein und darf nicht leer laufen. Eine Ausnahme ist der PARTI-MAG II. Dieser IDM ist für teilgefüllte Rohrleitungen geeignet. Falls ein leer laufen der Anlage nicht vermieden werden kann, werden ab DN 10 und bis zu einer Kabellänge von 50 m (bei getrennter Technik) über einen externen Kontakt oder automatisch durch das Modul „Detektor leeres Rohr“ die Signalausgänge abgeschaltet. Somit werden Messfehler in der Messstrecke bei leerem Rohr vermieden.

Bei den meisten Installationen ist es ausreichend, eine gerade Vorlaufstrecke von 3 x DN der Nennweite und eine Nachlaufstrecke von 2 x DN der Nennweite des Aufnehmers zu realisieren. Das sind Herstellerangaben. Nach Referenzbedingungen nach EN 29104, eichfähige Ausführungen oder DVGW-Richtlinien sind andere Strekken angegeben und einzuhalten.

Der IDM muss so installiert werden, dass das Messrohr immer mit Messstoff gefüllt ist (Ausnahme PARTI-MAG II). Ventile oder andere Absperrorgane sollten in der Auslaufstrecke montiert werden. Eine leichte Steigung von ca. 3 % ist zur Entgasung günstig. Es sollte gewährleistet sein, dass die gedachte Verbindungslinie der beiden Elektroden möglichst waagerecht oder bis zu 45° installiert wird, damit keine Luft- oder Gasblasen die Messspannung, die an den Elektroden abgegriffen wird, beeinflussen kann.

Hinweis:

Aufgrund unterschiedlicher Genauigkeitsangaben sowie der nennweitenabhängigen Vor-/Nachlaufstrecken innerhalb der Geräte (Ein-/Auslauf vom Flansch zur Elektrodenebene) sind auch kürzere Vor- und Nachlaufstrecken möglich. Bei Bedarf sprechen Sie mit **ABB**.

Das Prüfsystem der magnetisch-induktiven Durchflussmesser ist optimal ausgebaut. Neben internen Testfunktionen gibt es Simulatoren, mit deren Hilfe sich fast alle Parameter überprüfen lassen.

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th>Arbeiten am Einbauort</th><th>Rohrleitung vor Einbauort</th><th>Wartung im Betrieb</th><th>Eigenüber wachung</th><th>Service</th></tr>
<tr><td rowspan="3">unmittelbare Volumenzähler</td><td>Ovalradzähler</td><td>Flansch-verbindung</td><td>Filter</td><td>wartungsfrei</td><td>nicht möglich</td><td rowspan="3">örtliche Demon-tage möglich</td></tr>
<tr><td>Ringkolbenzähler</td><td>Flansch-verbindung, Gewinde</td><td>Filter empfohlen, keine Beruhi-gungsstrecke</td><td>wartungsfrei</td><td>nicht möglich</td></tr>
<tr><td>Drehkolbenzähler</td><td>Flansch-verbindung</td><td>Filter</td><td>Schmierung überwachen</td><td>nicht möglich</td></tr>
<tr><td rowspan="6">mittelbare Volumenzähler</td><td>Flügelradzähler</td><td>Flansch-verbindung, Gewinde</td><td>keine Beruhigungs-strecke</td><td>wartungsfrei</td><td>nicht möglich</td><td rowspan="2">Mess-einsatz-tausch möglich</td></tr>
<tr><td>Woltmanzähler</td><td>Flansch-verbindung</td><td>keine Beruhigungs-strecke</td><td>wartungsfrei</td><td>nicht möglich</td></tr>
<tr><td>Turbinenradzähler</td><td>Flansch-verbindung, elektrische Installation</td><td>keine Beruhigungs-strecke</td><td>wartungs-frei, evtl. Fremd-schmierung überwachen</td><td>nicht möglich</td><td>Auf-nehmer aus-tauschen</td></tr>
<tr><td>Wirbel-Durchflussmesser</td><td>Flanschver-bindung oder Zwischen-flanscheinbau, elektrische Installation</td><td>keine Beruhigungs-strecke</td><td>wartungsfrei</td><td rowspan="2">ständige Plausi-bilitäts- und Fehler-über-wachung und Feh-lermel-dung</td><td rowspan="2">elektron. Kontroll-funktion und Test-werte, Messfüh-ler aus-tauschbar</td></tr>
<tr><td>Drall-Durchflussmesser</td><td>Flansch-verbindung, elektrische Installation</td><td>keine Beruhigungs-strecke</td><td>wartungsfrei</td></tr>
</table>

Tab. 4-19: Bedienungsaufwand

		Arbeiten am Einbauort	Rohrleitung vor Einbauort	Wartung im Betrieb	Eigenüber wachung	Service
Durchflussmesser	Wirkdruck-Messverfahren	Geber zentriert einflanschen, Wirkdruck-leitung, Armaturen, Mess-umformer, Hilfsenergie	lange Beruhigungs-strecken	regel-mäßige Kontrolle empfohlen	nicht möglich	Direkt-messung am Geber
	Schwebekörper-Durchflussmesser	Flansch- oder Gewinde-verbindung	keine Vorschriften	wartungsfrei	ständige Plausi-bilitäts- und Fehler-über-wachung und Fehler-meldung	Glas-Durchfluss-messung in „SNAP-IN“-Version
	Magn.-induktiver Durchflussmesser	Flansch-verbindung, elektrische Installation	kleine Beruhigungs-strecke	wartungsfrei		el. Kontroll-funktion und Test-werte, Si-mulatoren
	Ultraschall-Durchflussmesser	Flansch-verbindung, oder Einschweiß-stutzen, elektr. Installation	lange Beruhigungs-strecke	wartungsfrei	Signalisie-rung weniger Ausfall-erschei-nungen	
	Masse-Durchfluss-messer, Coriolis	Flansch-verbindung, Wandbefesti-gung, elektr. Installation	keine Vorschriften	wartungsfrei	ständige Plausi-bilitäts- und Fehler-über-wachung und Fehler-meldung	elektro-nische Kontroll-funktionen und Test-werte
	Masse-Durchfluss-messer, thermisch	Flansch-, Zwi-schenflansch-montage und Einsteckfühler	Beruhigungs-strecke	wartungsfrei	Fehler-meldung	Mess-fühler aus-tauschbar

Tab. 4-20: Fortsetzung Bedienungsaufwand

4.2 Geräte für Gerinne und Freispiegelleitung

Die Vergleichstabelle (Tab. 4-21) ist nicht so umfangreich wie die der Geräte für die geschlossene Rohrleitung. Eine große Zahl von Parametern bezieht sich ausschließlich auf die Rohrleitung, und außerdem ist das Einsatzspektrum der hier betrachteten Geräte stark eingeschränkt. Gerinne und Freispiegelleitungen werden vorwiegend mit Wasser oder Abwasser betrieben, so dass nur diese Messstoffe untersucht werden.

Abwasser enthält oft eine Reihe von Nichtwasseranteilen, auf die beim Vergleich Rücksicht genommen werden muss. Chemisch aggressive Anteile spielen bei der Werkstoffauswahl eine wichtige Rolle. Feststoffanteile können die Messung verfälschen oder behindern. Deshalb ist wichtig, dass die Schleppkräfte des Wassers für den Weitertransport dieser Feststoffe ausreichen.

		Gerätegrößen	max. mögl. Durchfl.	Messspanne	Fehlergrenze	Messwertanzeige und -übertragung	Feststoffe im Messgut	Luft im Wasser	Strömungstechnische Einflüsse
offenes Gerinne	Messwehre	praktisch unbegrenzt	unbegrenzt	1:20 (1:100)	> 3 %	Bei entsprechender Auswahl der Messwertaufnehmer ergeben sich alle Möglichkeiten von der örtlichen Anzeige bis zum HART-Protokoll	Gefahr der Verlandung vor dem Wehr und des Ansatzes an der Überfallkannte	Belüftung erforderlich, damit sich der Strahl an der Messkannte ablöst	keine
	Venturikanal	Breite in mm 220...3514	13.990 m^3/h	1:10 bis 1:20	(Bauartkalibrierung) ± 6 % v. Messwert		keine Sedimentation, wenn Mindestgeschwindigkeit eingehalten wird	Entgasung im Zulauf	Einlaufstrecke von 20 x B gerade, glatt rechtwinklig
Freispiegelleitung	IDM im Düker	alle DN bis DN 2500	267.000 m^3/h	1:50	± 0,25 % v. Messwert	Magn.-induktive Durchflussmesser bieten alle Möglichkeiten von der örtlichen Anzeige bis zur Schnittstelle und HART-Protokoll	Sendimentationsgefahr bei kleiner Fließgeschwindigkeit und schweren Teilen	Luft verhindern, andernfalls Fehlmessung	3 x D Vorlaufstrecke
	Parti-MAG	DN 150 bis DN 2000	171.000 m^3/h	1:100	± 1,5 % v. E.		keine Sedimentation	Entgasung im Zulauf	Beruhigungsstrecke 10 · DN Vorlauf, 5 · DN Nachlauf

Tab. 4-21: Geräte für Gerinne und Freispiegelleitung

4.2.1 Feststoffe im Messgut

Wenn die Fließgeschwindigkeit im Stau vor dem Messwehr abnimmt, sinken mitgeführte Messstoffe zu Boden. Die Sedimente verändern die geometrischen Verhältnisse und führen zu Messfehlern. Schwimmende Teile verändern die Geometrie noch stärker oder sie verstopfen sogar den Messüberfall.

Der Venturikanal beschleunigt die Flüssigkeit an der Einschnürungsstelle und treibt Feststoffe durch. Schwimmende Teile können den Niveauabgriff negativ beeinflussen. Schaumbildung verursacht Fehlmessungen, und zwar abhängig von der Type des verwendeten Messwertaufnehmers.

Im gedükerten Rohr kann es bei extrem niedriger Fließgeschwindigkeit zur Sedimentation kommen, die aber keinen nennenswerten Messfehler verursacht. Erhöht sich die Geschwindigkeit, wird der Düker freigespült (eine Sandablagerung im geraden Rohr wird schon bei Geschwindigkeiten von > 0,25 m/s abgetragen).

Durch den Einsatz des PARTI-MAG's II lösen sich diese Probleme von selbst.

4.2.2 Gasanteile

Gasanteile sind in der Regel Lufteinschlüsse. Da alle beschriebenen Messgeräte zum Zeitpunkt der Messung das Volumen erfassen, wird der Luftanteil im Wasser als Flüssigkeit angesprochen und verursacht einen um diesen Anteil vergrößerten Messwert.

Am Messwehr ist die Belüftung durch seitliche Luftzufuhr notwendig, damit der Überfallstrahl sich von der Messkante ablöst und nicht durch Sogwirkung an der Wehraußenseite festgehalten wird. Diese Belüftung bewirkt aber keine Lufteinschlüsse an der Niveaumessstelle ca. 4 h vor der Wehrkante. Grundsätzlich gilt, dass Gerinnemessungen nur sehr selten durch Lufteinschlüsse gestört werden.

Auch beim PARTI-MAG entgast der Messstoff innerhalb der Vorlaufstrecke. Besteht allerdings die Möglichkeit, dass bei vollgefülltem Rohr Luft im Wasser verbleibt, so kann die Luft vor der Messzone nicht mehr entweichen. Es gibt Messfehler.

Beim Düker dagegen könnte durch Wirbelbildung im Einlauf Luft angesaugt werden. Durch Anheben des Wasserspiegels vor dem Düker (Vorschacht) lässt sich dieser Effekt verhindern. Wenn das zuströmende Wasser als freier Strahl in einen Vorschacht fällt, hat das die gleiche Wirkung: Lufteinzug.

4.2.3 Strömungstechnische Einflüsse

Die Strömungseinflüsse in der geschlossenen Rohrleitung waren unter Kapitel 4.1.2 angesprochen worden. Die Angaben gelten natürlich auch hier, speziell für den magnetisch-induktiven Durchflussmesser im Düker. Ein weiterer Parameter erschwert die Messung an Gerinnen, nämlich die Beschaffenheit der Flüssigkeitsoberfläche, denn Wellenbewegungen am Sitz des Messwertaufnehmers gehen in das Messwertergebnis ein. Das Messwehr ist nicht so empfindlich wie der Venturikanal.

Der Venturikanal staut in der Einlaufstrecke das Wasser etwas zurück und beruhigt damit die Oberfläche, zumal strömendes Fließverhalten eine Messbedingung ist. Die Einlaufstrecke soll geradlinig verlaufen bei gleich bleibendem Gerinnequerschnitt ohne Unebenheiten. Der Abstand eines Wechselsprungs vor dem Venturikanal muss mindestens 20 x B (Kanalbreite) betragen. An die Auslaufseite, dem Unterwasser, stellt sich die Forderung, dass es in keinem Fall zu einem Rückstau kommt, der in den Venturikanal zurückwirkt, denn dann entstünde ein Höhenstand am Messpunkt, der einen großen Durchfluss vortäuscht. Der Parshall-Kanal lässt etwas Rückstau zu.

Dieser Rückstau lässt sich messtechnisch ideal im magnetisch-induktiven Durchflussmesser PARTI-MAG II für teilgefüllte Rohrleitungen verarbeiten, weil dieses Gerät die benetzte Querschnittsfläche und die Fließgeschwindigkeit in Kombination dynamisch erfasst. Das bedeutet, dass bei Stillstand der Flüssigkeit kein Messsignal entsteht. Der PARTI-MAG II misst in beiden Fließrichtungen. Er kann also auch den Rückfluss erfassen.

Die Geschwindigkeitsverteilung innerhalb des durchflossenen Querschnitts im PARTI-MAG sollte annähernd egalisiert sein. Deshalb bevorzugt man den strömenden Fließzustand und vermeidet die Unregelmäßigkeiten, die beispielsweise durch einen nahen Wechselsprung verursacht werden. Nachstehend einige Beispiele für die zweckmäßige Leitungsführung:

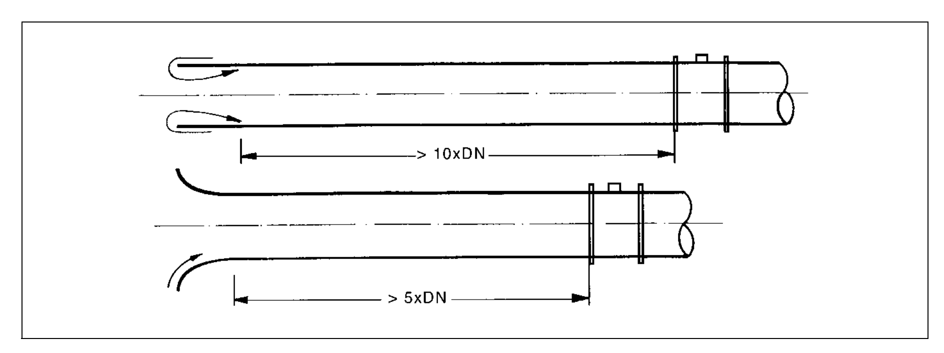


Bild 4-143: Rohreinlauf

Wird ein Rohr wie in Bild 4-143 stumpf angeströmt, so entstehen in den wandnahen Zonen des Einlaufs Ablösungserscheinungen mit Wirbelbildung. Je nach Rohrrauigkeit sind 15 x D (Rohrnennweite) und mehr erforderlich, damit die Messzone beruhigt ist. Ein strömungsgünstiger Einlauf, ähnlich einer Trompetenöffnung, gestattet die Verkürzung des Vorlaufs.

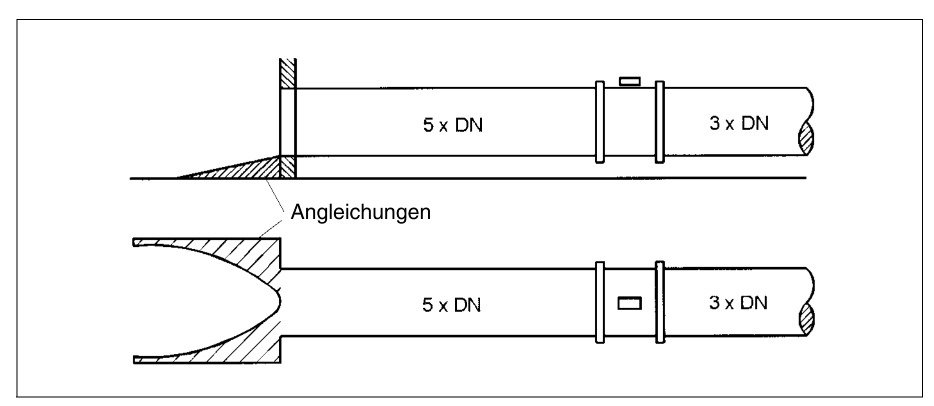


Bild 4-144: Übergang vom Rechteck auf Kreisquerschnitt

Ein so interessantes Gerät wie der PARTI-MAG III erspart Bauwerke und kann daher an vielen Stellen eingebaut werden. Die Anpassung an den Kreisquerschnitt ist sehr wichtig wegen der an dieser Stelle entstehenden Wellen und Wirbel. Ein Beispiel dafür ist der Übergang vom Rechteckquerschnitt zum Kreisquerschnitt (Bild 4-144). Sanfte Übergänge sind gewünscht, und ein wichtiger Gesichtspunkt ist die durchgehende Sohle auch im PARTI-MAG II. Beckenübergänge beginnen bereits im Beckenboden mit einer Rinne.

Auch beim Einbau in runde Kanäle muss Sohlengleichheit angestrebt werden. Je mehr sich der Kanalquerschnitt der Ei-Form annähert, umso besser kann der PARTI-MAG III eingepasst werden (Bild 4-145). Auch hier ist der strömungsgünstigste Übergang anzustreben.

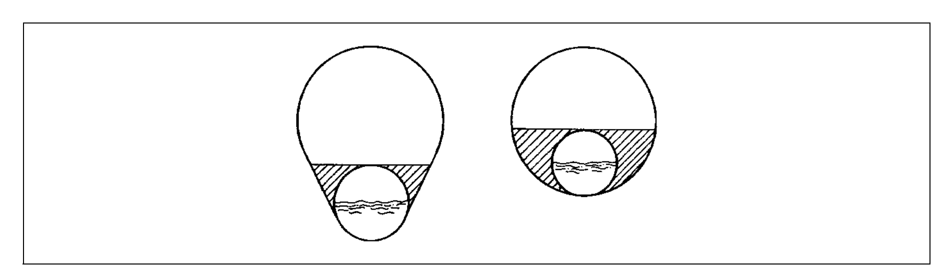


Bild 4-145: Übergang bei runden Querschnitten

Ganz wichtig ist die Betrachtung der Leitungsverhältnisse weit vor der Messstelle. Ein rechtwinklig angeordneter seitlicher Zufluss erzeugt Wirbel, die sich auch nach einer 15 x D langen Strecke nicht beruhigt haben (Bild 4-146). Ein Überfallwehr an der Einlaufstelle sorgt für ein erträgliches Strömungsprofil.

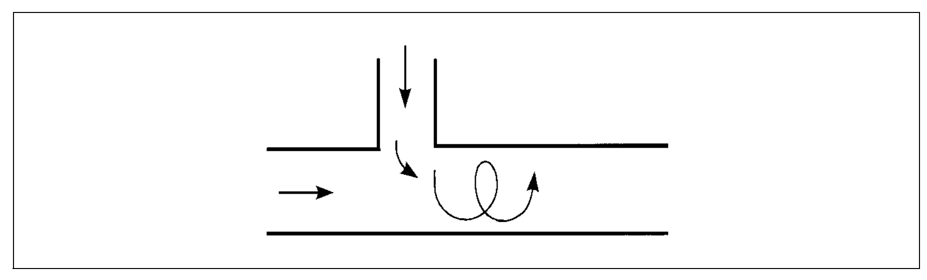


Bild 4-146: Teilgefüllter Kanal mit rechtwinklich angeordnetem seitlichen Zufluss (Draufsicht)

Schießender Zulauf muss sicher in den strömenden Fließzustand gewandelt werden. Bei dem im Bild 4-147a dargestellten Wechselsprung wandert die geometrische Position abhängig vom Energieinhalt des Zulaufs.

a)

Die unsichere Strömungslage verlangt dann entweder eine sehr lange Beruhigungsstrecke bis zur Messstelle oder eine örtliche Bindung des Wechselsprungs durch ein Tosbecken (Bild 4-147b), das den Wandel der kinetischen in Wärmeenergie besorgt.

b)

Eine weitere Variante ist der in Bild 4-147c angedeutete Übergangsschacht. In der dargestellten Form besteht die Gefahr des Lufteintrages bei Vollfüllung der Abflussleitung. Deshalb ist eine Entlüftungsmaßnahme erforderlich.

c)

Bild 4-147: Schießender Zulauf

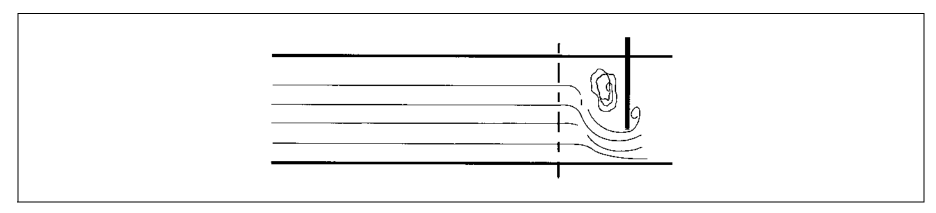


Bild 4-148: Flachschieber im Nachlauf

Der Schieber in der Leitung (Bild 4-148) erzeugt einen instationären Strömungszustand. Die hydromechanische Rückwirkung stromaufwärts ist allerdings gering. Daher liegt die Messstelle immer vor dem Schieber mit einer Entfernung von 1 bis 3 x D.

Die Rückwirkung von Störstellen hinter dem PARTI-MAG ist relativ gering, so dass in der Regel kurze Nachlaufstrecken ausreichen. Als Beispiel sei hier der freie Absturz (Bild 4-149) angesprochen.

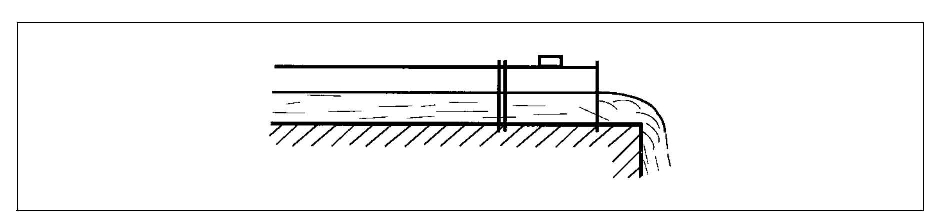


Bild 4-149: Absturz hinter der Messstelle

Natürlich muss die Entfernung so groß sein, dass die Absenkungskurve der Wasseroberfläche nicht in das Messrohr zurückreicht. Die Entfernung von 3 x D reicht meistens aus.

Gelegentlich muss man hinter einem Gerinnekrümmer messen mit möglicherweise geneigter Sohle (Bild 4-150). Die Zentrifugalkräfte bewirken eine geneigte Wasseroberfläche und querlaufende Sekundärströmungen. Die örtlichen Verhältnisse bestimmen eine mögliche Fehlmessung.

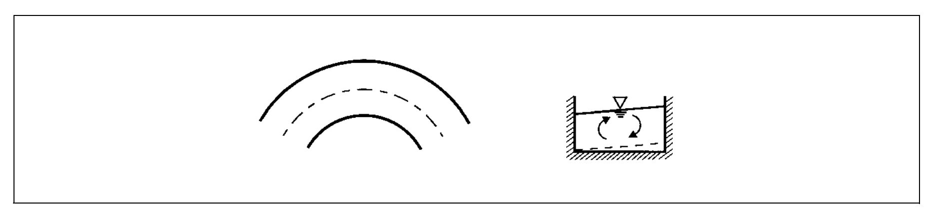


Bild 4-150: Querschnitt durch Gerinnekrümmer

5 Markante Merkmale der Messgeräte im Überblick

5.1 Ovalradzähler, Ringkolbenzähler

Vorteile:

- gute Genauigkeit
- einsetzbar für Flüssigkeiten mit großer Viskosität
- arbeitet in beiden Fließrichtungen (Vor- und Rücklauf)
- kein Strömungsprofileinfluss, daher keine Beruhigungsstrecke
- keine Hilfsenergie
- eichamtlich zugelassen

Einschränkungen:

- Volumenzähler
- nur für Flüssigkeiten
- großer Druckverlust
- bewegliche Teile, Verschleiß
- bei kleiner Viskosität Fehlervergrößerung durch Spaltverluste
- empfindlich gegen Verschmutzung, Filter erforderlich
- Durchflussblockade bei Stillstand durch Verschmutzung
- empfindlich gegen Überlastung
- Überwachung und Wartung

5.2 Drehkolbenzähler

Vorteile:

- hervorragende Genauigkeit für die Gasmessung
- keine Beruhigungsstrecken
- keine Hilfsenergie
- eichamtlich zugelassen

Einschränkungen:

- Volumenzähler
- ausschließlich für Gase
- bewegliche Teile, Verschleiß
- Durchflussblockade bei Stillstand durch Verunreinigung
- träge gegenüber schnellen Änderungen
- aber auch empfindlich gegenüber schnellen Änderungen bei großem Differenzdruck, Gefahr des Überdrehens
- Überwachung

5.3 Turbinenzähler

Vorteile:

- keine Hilfsenergie bei Flügelrad und Woltman
- eichamtliche Zulassung für Wasser bei Flügelrad und Woltman
- Turbinenrad verwendbar für cryogene Flüssigkeit
- Turbinenrad einsetzbar bei extremen Temperaturen und Drücken
- eichamtliche Gas-Zulassung für Turbinenrad

Einschränkungen:

- begrenzte Werkstoffauswahl
- nur für niedrige Viskositäten
- bewegliche Teile, Verschleiß
- empfindlich gegen Verschmutzung
- axial in Strömungsrichtung liegende Zähler sind Strömungsprofil-abhängig
- Beruhigungsstrecke (nicht bei Flügelrad)
- empfindlich gegen Überlast und schnelle Änderung bei großem Differenzdruck, Gefahr des Überdrehens
- empfindlich gegen Vibration

5.4 Wirbel-Durchflussmesser

Vorteile:

- keine beweglichen Teile
- robuster Aufbau
- einsetzbar bei Flüssigkeit, Gas, Dampf
- leicht sterilisierbar
- unabhängig von Druck-, Temperatur-, Dichteänderung
- lineares Verhältnis zwischen Durchfluss und Messwert

Einschränkungen:

- Beruhigungsstrecken
- Mindest-Reynoldszahl erforderlich

5.5 Drall-Durchflussmesser

Vorteile:

- keine beweglichen Teile
- keine Beruhigungsstrecken
- einsetzbar bei Flüssigkeit, Gas, Dampf
- hervorragende Reproduzierbarkeit
- unabhängig von Druck-, Temperatur-, Dichteänderung

Einschränkungen:

- Druckverlust
- Mindest-Reynoldszahl erforderlich

5.6 Wirkdruck-Messverfahren

Vorteile:

- universell verwendbar für Flüssigkeit, Gas, Dampf
- auch in Extremfällen, z. B. Viskosität, einsetzbar wegen unterschiedlicher Varianten
- Berechnungsmöglichkeiten für außergewöhnliche Fälle
- einsetzbar bei extremen Temperaturen und Drücken
- Bereichsänderung möglich
- niedriger Druckverlust in Düsen

Einschränkungen:

- quadratischer Zusammenhang zwischen Durchfluss und Messgröße Wirkdruck, daher kleine Spanne
- Einfluss von Druck- und Dichteänderung
- Druckverlust bei Blende
- Kantenschärfe der Blende muss sichergestellt sein, daher keine Feststoffe oder Verschmutzung
- sehr lange Beruhigungsstrecken
- aufwendige Installation durch Wirkdruckleitung, Armaturen und Messwertwandler
- Montage- und Wartungserfahrung zweckmäßig
- wartungsintensiv

5.7 Schwebekörper-Durchflussmesser

Vorteile:

- preiswert
- keine Hilfsenergie bei örtlicher Anzeige
- einsetzbar bei Flüssigkeit, Gas, Dampf
- keine Beruhigungsstrecke
- einfacher Geräteaufbau, daher montage- und wartungsfreundlich
- Anzeige auch bei undurchsichtigen Flüssigkeiten
- Metallkonusgerät mit Messumformer
- Metallkonusgerät sterilisierbar, CIP-geprüft

Einschränkungen:

- senkrechte Einbaulage
- konstanter Druckverlust
- Einfluss von Dichte-, Temperatur-, Viskositätsänderungen
- Feststoffe beschädigen Messkante, ansonsten leichte Verschmutzung zulässig
- empfindlich gegen Pulsation und Vibration
- teuer bei Verwendung exotischer Werkstoffe

5.8 Magnetisch-induktiver Durchflussmesser

Vorteile:

- freier Rohrquerschnitt ohne hereinragende Teile
- keine beweglichen Teile
- kein zusätzlicher Druckverlust
- weitgehend strömungsunabhängig, deshalb geringe Beruhigungsstrecke
- kein Einfluss der Änderung von Temperatur, Dichte, Viskosität, Konzentration, elektr. Leitfähigkeit
- günstige Werkstoffwahl bei chemisch aggressiven und bei abrasiven Messstoffen
- unempfindlich gegen Verschmutzung, Sedimentation
- besonders geeignet für hydraulischen Feststofftransport
- sterilisierbar, CIP-geprüft
- linearer Zusammenhang zwischen Durchfluss und Messgröße
- arbeitet in beiden Fließrichtungen (Vor-, Rücklauf)
- Messbereich optimierend einstellbar
- wartungsarm, aber trotzdem wartungsfreundlich
- eichamtlich zugelassen

Einschränkungen:

- nur bei Flüssigkeiten
- untere Leitfähigkeitsgrenze 0,05 µS/cm
- Gasanteile verursachen Fehler

5.9 Ultraschall-Durchflussmesser

Vorteile:

- freier Rohrquerschnitt
- keine beweglichen Teile
- kein zusätzlicher Druckverlust
- günstige Werkstoffauswahl bei chemisch aggressiven Flüssigkeiten
- linearer Zusammenhang zwischen Durchfluss und Messgröße
- wartungsarm
- arbeitet in beiden Fließrichtungen (Vor-, Rücklauf)
- beim Laufzeitverfahren kein Einfluss von Temperatur, Dichte, Konzentration
- nachträglicher Einbau ins Rohr mit Einzelelementen möglich, aber örtliche Kalibrierung

Einschränkungen:

- für Flüssigkeiten, Gasmessung noch anfällig
- Schallstrahl muss querschnittsrepräsentativ messen, deshalb sehr strömungsprofilabhängig. Lange Beruhigungsstrecke
- Fehler bei Ablagerungen
- Laufzeitverfahren nur bei sauberen Flüssigkeiten
- Dopplerverfahren nur bei leichter Verschmutzung oder mit wenig Gasblasen
- beim Dopplerverfahren Einfluss von Schallgeschwindigkeitsänderungen durch Temperatur, Dichte, Konzentration
- ungeeignet für stark verschmutzte Flüssigkeiten
- Fehler durch Gasblasen

5.10 Masse-Durchflussmesser nach dem Coriolis-Prinzip

Vorteile:

– echte Massemessung
– zusätzliche Temperatur- und Dichtemessung
– sehr gute Genauigkeit für Masse-Durchfluss
– hochgenaue Dichtemessung
– unabhängig von Druck, Temperatur, Viskosität
– keine Beruhigungsstrecken
– arbeitet in beide Fließrichtungen (Vor-, Rücklauf)
– sterilisierbar, CIP-geprüft, EHEDG zertifiziert
– Messbereiche für Durchfluss und Dichte optimierend einstellbar
– selbstentleerend

Einschränkungen:

– nur für Flüssigkeiten
– Gasanteile stören
– vibrationsempfindlich bei unsachgemäßer Befestigung
– Werkstoffauswahl begrenzt
– Nennweitenbegrenzung nach oben

5.11 Masse-Durchflussmesser, thermisch

Vorteile:

– direkte Massemessung für Gase
– keine Druck- und Temperaturkompensation
– sehr geringer Druckverlust
– hohe Messgenauigkeit
– große Messspanne
– keine beweglichen Teile
– robuster Aufbau
– schnelle Ansprechzeit
– leicht sterilisierbar

Einschränkungen:

– nur für Gase
– Beruhigungsstrecken

5.12 Messwehre

Vorteile:

- einfacher Aufbau
- geringer Platzbedarf am Messort
- geringer baulicher Aufwand

Einschränkungen:

- Aufstau, dadurch Platzbedarf vor dem Messort
- Gefahr der Ablagerung und Sedimentation vor dem Wehr, keine Messmethode für Abwasser
- Strahlablösung durch Belüftung sicherstellen
- anfällig gegen größere Schwimmteile

5.13 Venturikanal

Vorteil:

- kleine Energiehöhendifferenz gegenüber dem Wehr
- kleiner Druckverlust
- geeignet für verschmutztes Abwasser
- problemlose Wartung

Einschränkungen:

- nicht lineare Kennlinie
- Kanaleinengung, dadurch Aufstau des Oberwassers und Sedimentations-Gefahr bei Geschwindigkeitsverminderung
- Verstopfungsgefahr durch sperrige Schwimmteile
- Messung versagt bei Rückstau des Unterwassers bis in den Venturi-Kanal (Ausnahme: Parshall-Kanal)
- Güte und Zuverlässigkeit der Messung ist abhängig vom nachgeschalteten Messwertaufnehmer
- Installationskosten

5.14 Magnetisch-induktiver Durchflussmesser im Düker

Vorteile:

- alle Vorteile des magnetisch-induktiven Durchflussmessers wie unter Punkt 5.8
- kleine Nennweite gegen PARTI-MAG II, preiswerter
- genauer als PARTI-MAG II

Einschränkungen:

- Bauwerk erforderlich, teuer
- gegen PARTI-MAG II größerer Druckverlust
- Sedimentationsgefahr bei zu kleiner Fließgeschwindigkeit

5.15 Magnetisch-induktiver Durchflussmesser PARTI-MAG II für teilgefüllte Rohrleitungen

Vorteile:

- freier Durchgang
- kein zusätzlicher Druckverlust
- keine Sedimentationsgefahr
- alle Vorteile des magnetisch-induktiven Durchflussmessers, wie unter Punkt 5.8
- einfache Reinigung
- Rückstau ist zulässig

Einschränkungen:

- Beruhigungsstrecke

6 Stichworte zu Betriebsbedingungen und Forderungen an die Messstelle

Wird eine Messstelle geplant, so ergibt sich deren Notwendigkeit aus dem gewünschten Messeffekt. Das Messgerät soll also entweder selbst etwas aussagen (z. B. örtliche Anzeige) oder eine Funktion unterstützen (z. B. als Istwertgeber für einen Regler). Der Planer beginnt seine Recherchen für die Geräteauswahl bei den Betriebsbedingungen. Er stellt die Fragen nach dem Messstoff, nach den örtlichen Gegebenheiten und stellt die Forderung nach der Darstellung des Messwertes. Dazu nachstehende Stichwortzusammenstellung:

Beschaffenheit des Messstoffes:

- Gas, Dampf: trocken, feucht
- Flüssigkeit: Gasanteil, Feststoffe, ablagernde kristallisierende Inhaltsstoffe, Staub im Gas
- Dichte
- Temperatur, Temperaturänderung, zeitlicher Ablauf
- Viskosität
- elektrische Leitfähigkeit des Messstoffes, der Ablagerung
- chemische Aggressivität, Werkstoffauswahl
- Abriebgefahr

Betriebsbedingungen:

- Nennweite der Rohrleitung
- Ausbildung des Gerinnes, Gefälle, Rückstau
- Druckstufe
- Durchfluss, kleinster, größter Wert; Änderungsgeschwindigkeit (stoßförmige Änderung)
- Strömungsverhältnisse: lineare, turbulente Strömung Geschwindigkeitsverteilung, Drall, Pulsation
- beide Fließrichtungen (Vor-, Rücklauf)
- statischer Druck, Druckstoß, Druckverlust zulässig

örtliche Gegebenheiten:

- Umgebungstemperatur
- Feuchtigkeitseinfluss, Schutzart
- Staubeinwirkung, Schutzart
- Vibration
- Leitungsbeschaffenheit vor und hinter der Messstelle
- Explosionsschutz
- Hilfsenergie, Leitungsführung
- Einstreuung elektrischer Störungen
- Befestigungsmöglichkeit

Darstellung des Messwertes:

- Genauigkeit
- fester, einstellbarer Messbereich intern, extern
- interne, externe Kontrollmöglichkeit
- örtliche Anzeige
- Zählung, Integration
- Grenzwertsignal
- analoges Einheitssignal, welche Werte?
- Impulsausgang zur Fernzählung
- Schnittstelle, welche?
- PROFIBUS
- HART-Protokoll
- Explosionsschutz
- Eichfähigkeit

7 Werkstoffe, Beständigkeitstabelle

Zur Auswahl eines Messgerätes gehört auch die Bestimmung der einzusetzenden Werkstoffe. Dabei interessieren natürlich in erster Linie die mit dem Messstoff in Berührung kommenden Materialien. Aber auch die Umgebungsatmosphäre darf nicht vernachlässigt werden, wobei die Feuchtigkeit am häufigsten zu beachten ist.

Im allgemeinen kennt der Anwender seine Messstoffe so gut, dass er auch die Werkstoffe mühelos bestimmen kann. Die nachstehende Tabelle soll der Hilfestellung dienen. Die angegebenen Hinweise sind den Resistenzlisten der Hersteller entnommen. Eine Garantie für die Vollständigkeit und Richtigkeit kann nicht übernommen werden.

Die folgende Aufstellung beinhaltet die Varianten der in den einzelnen Messgeräten mit dem Messstoff in Berührung kommenden Werkstoffe.

Wirbel-Durchflussmesser:

Messrohr:	1.4571; 1.4435; Hastelloy C
Fühler:	1.4571; 1.4435; Hastelloy C
Stör-/Leitkörper:	1.4571; 1.4435; Hastelloy C
Dichtung:	Graphit, PTFE, Viton A, Kalrez

Drall-Durchflussmesser:

Messrohr:	1.4571, 1.4435, Hastelloy C
Fühler:	1.4571, 1.4435, Hastelloy C
Stör-/Leitkörper:	1.4571, 1.4435, Hastelloy C
Dichtung:	Graphit, PTFE, Viton A, Kalrez

Magnetisch-induktive Durchflussmesser:

Auskleidung	Hartgummi; Weichgummi; PFA; PTFE; Torlon, Peek, PVDF
Elektroden	1. 4571; Hastelloy B; Hastelloy C; 1.4539; Titan; Tantal; Platin Ir.

Masse-Durchflussmesser:

Messrohr	1.4571; 1.4435; Hastelloy C

Thermischer Masse-Durchflussmesser

Messrohr	1.4571; Hastelloy
Fühler	1.4571; Hastelloy:, Keramik Al_2O_3
Dichtung	Viton; Kalrez

Schwebekörper-Durchflussmesser:

Messrohr	Glas; Hastelloy C; PTFE; 1.4404
Schwebekörper	Glas; 1.4571; Hastelloy C; PVDF; PTFE
Fittinge	1.4301; PVC; Hastelloy C
O-Ringe	Buna N; Viton A; Ethylen/ Propylen = EPDM

Zur Handhabung der folgenden Beständigkeitstabelle:

\+ bedeutet verwendbarer Werkstoff
\- bedeutet ungeeigneter Werkstoff
offene Felder bezeichnen unbekannte Beständigkeiten

Bei den metallischen Werkstoffen kann eine Resistenz durchaus gegeben sein, jedoch sich aufgrund elektrochemischer Reaktionen eine Fehlfunktion beim IDM einstellen.

	Gasförmig/Flüssig	Elektrische Leitfähigkeit	Konzentration (%)	Temperatur (°C)	Metalle									Nichtmetalle										
					1.4301	1.4539	1.4541	1.4571	Hasteloy B	Hasteloy C	Titan	Tantal	Platin	Hartgummi	Weichgummi	PFA	PTFE	EPDM	Buna N	Viton A	PVDF	PVC	Glas	Al_2O_3
Aceton	F	-	100	40	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+
Acetylen	G	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+				+	+
Äthan	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+		-	-	+	+
Äthanol	F	-	96	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-		+	
Äthylacetat	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-		+	+
Äthylalkohol	F	-	100	78	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+		+			-	+	+
Äthyläther	F	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+		+	-	+	+
Äthylen	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+		+	+	+	+
Äthylenchlorid	F	-	100	50	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+		-	-	+	+
Äthylenglykol	F	+	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+			-	-	+	+
Alum.chlorid-Lösung	F	+	30	70	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+		+			+		+	+	+
Alum.chlorid-Lösung	F	+	80	70	-	-	-	-	+	-	-	+	+				+			+		+	+	+
Alum.sulfat-Lösung	F	+	20	50	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+		+			+			+	+
Alum.sulfat-Lösung	F	+	50	50	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-		+			+			+	+
Ameisensäure	F	+	100	80	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+		+	-	+	+
Ammoniak	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+
Ammoniak-Lösung	F	+	25	50	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+		+	+	+	+
Anilin	F	-	100	25	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-		+			+		-	+	+
Apfelsäure	F	+	50	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+
Argon	G	-	100	100	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Benzin	F	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-		+	+	-	+	+
Benzol	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-		-	-	-	+	+
Bier	F	+		10	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+		+		+	+	+
Bierwürze	F	+		5	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+		+		+	+	+
Blausäure (Zyanw.stoff)	F	+	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+			+		+	+	+
Blut	F	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+		+	+	+	+	+
Brom	F	-	100	20	-	-	-	-	-	+	-	+	+			+	+			+		-	+	+
Bromwasserstoffsäure	F	+	48	50	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-		+		+	+	+
Butan	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	-	+	+	-	-	+	+
Butylacetat	F		100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+		-	+	-	+	+
Butylalkohol	F	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+		+	+		+	+	+
Butylen	G	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+		+	+	+
Calciumchlorid-Lösung	F	+	100	20	+		+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

	Gasförmig/Flüssig	Elektrische Leitfähigkeit	Konzentration (%)	Temperatur (°C)	Metalle									Nichtmetalle										
					1.4301	1.4539	1.4541	1.4571	Hasteloy B	Hasteloy C	Titan	Tantal	Platin	Hartgummi	Weichgummi	PFA	PTFE	EPDM	Buna N	Viton A	PVDF	PVC	Glas	Al_2O_3
Calciumhydroxid-Lösg.	F	+	50	50	+	+	+	+	+	+			+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Calciumhypochlorid-L.	F	+	20	50	-	-	-	-	-	+	+	+	+			+	+	+		+			+	+
Caprolactam	F	-	50	50				+	+	+			+	+	-								+	+
Carbonsäure, verdünnt	F	-		50			+	+	+	+	+	+	+			+	+				+	-	+	+
Chlor, trocken	G	-	100	20	+	+	+	+	-	+		+		+	-	+	+	-		+	+	+	+	+
Chlor, feucht	G	-	100	20	-	+	-	-	-	+		+		-	-	+	+	-		+	+	+	+	+
Chlor, trocken	F	-	100	20	+	+	+	+	-	+		+	+	-	-	+	+	-		+	+	-	+	+
Chlordioxid, trocken	G	-	100	20	+					+		+	+	-	-	+	+				+		+	+
Chlorwasser	F	+	100	20	-	-	-			+		+		-	-	+	+	+		+	+	-	+	+
Chlorwasserstoff	G	-	100	20	-	+	+	+	+	+		+	+	-	-	+	+	+	+		+		+	+
Deionat	F	-			+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Diesel	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+		+	-	+	+
Eisen-III-chlorid-Lösg.	F	+	3	20	-	+	-	-	-	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+
Eisen-III-chlorid-Lösg.	F	+	10	20	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Eisen-III-sulfat-Lösg.	F	+	10	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+
Erdgas, trocken	G	-	100	40	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+		+	+	+	+
Essigsäure	F	+	50	80	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+			+	-	+	+
Essigsäureanhydrid	F	+	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+					+	+	+
Fettsäure	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+			+		+	+	+
Fluor	G	-	100	20	+	+	+	+	-	+		-				+	+	-			+	+	-	-
Flusssäure	F	+	40	20	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-
Flusssäure	F	+	70	20	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-
Formaldehyd-Lösung	F	+	40	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-		+	+	+	+	+
Fotoemulsion	F	+		20	+	+	+	+		+			+			+	+						+	+
Gelantine	F	+		50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Gerbsäure	F	+	50	50			+	+		+				+	+	+	+	-			-		+	+
Glykol	F	-	100	50				+	+	+	+	+	+			+	+			+	+		+	+
Glyzerin	F	-	100	100	+	+	+	+		+	+	+	+	+	-	+	+	-		+	-	-	+	+
Harnstoff	F	+	30	50			+			+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Hefe	F	+		20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Heizöl	F	-	100	80	+	+	+	+		+						+	+	-	+		+		+	+

	Gasförmig/Flüssig	Elektrische Leitfähigkeit	Konzentration (%)	Temperatur (°C)	Metalle									Nichtmetalle										
					1.4301	1.4539	1.4541	1.4571	Hastelloy B	Hastelloy C	Titan	Tantal	Platin	Hartgummi	Weichgummi	PFA	PTFE	EPDM	Buna N	Viton A	PVDF	PVC	Glas	Al_2O_3
Helium	G	-	100	80	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+			+	-	+	+
Heptan	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+		+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+
Hexan	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+		+	+			+	+	-		+	+	-	+	+
Hydrazin-Lösung	F	+	25	20	+	-	+	-					+	-	-	+	+	+	-		+	+	-	-
Kaliumchlorid-Lösung	F	+	30	20	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kaliumhydroxid-Lösg.	F	+	50	20	+	+	+	+	+	+	-	-	+			+	+	+		-	+	+	+	+
Kaliumpermanganat-L.	F	+	50	20	+	+	+	+		+		+	+	-	-	+	+		+	+	+	-	+	
Kaliumsulfat-Lösung	F	+	20	50	+	+	+	+	+		+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+
Karbolsäure	F	-	90	50	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+
Kerosin	F	-	100	20	+			+								+	+		+	+			+	
Kohlendioxid	G	-	100	50	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kohlensäure	F	+		50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Krypton	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+		-	-	+	+
Kupferchlorid-Lösung	F	+	50	20	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+
Kupfersulfat-Lösung	F	+	50	80	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Kupfersulfat-Lösung	F	+	100	80	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Magnesiumchlorid-L.	F	+	50	20	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Magnesiumsulfat-Lös.	F	+	20	50	+	+	+	+	+	-		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Meerwasser	F	+		50	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Methan	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+
Methanol = Methylalk.	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+
Methylbenzol = Toluol	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+				-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+
Methylenchlorid	G	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+
Monochloressigsäure	F	+	70	50				+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-		-	+	+
Natriumbikarbonat-Lös.	F	+	20	50			+	+	+	+	+		+	+		+	+		+	+	+		+	+
Natriumbisulfat-Lösung	F	+	10	50	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
Natriumbisulfat-Lösung	F	+	50	50	+	+	+	+		+	+	+	+	+		+	+		+		+	+	+	+
Natriumchlorid-Lösung	F	+	10	20	-	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Natriumchlorid-Lösung	F	+	20	20	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Natriumhydroxid-Lösg.	F	+	20	50	+	+	+	+	+	+	+	-		+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	+
Natriumhydroxid-Lösg.	F	+	50	50	+	+	+	+	+	+	-	-		+	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-
Natriumhypochlorid-L.	F	+	20	50	-	-	-	-		+	+	-	+	-	-	+	+	+		+	+	-	+	+

	Gasförmig/Flüssig	Elektrische Leitfähigkeit	Konzentration (%)	Temperatur (°C)	Metalle									Nichtmetalle										
					1.4301	1.4539	1.4541	1.4571	Hasteloy B	Hasteloy C	Titan	Tantal	Platin	Hartgummi	Weichgummi	PFA	PTFE	EPDM	Buna N	Viton A	PVDF	PVC	Glas	Al_2O_3
Natriumkarbonat-Lösg.	F	+	50	50	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Natriumnitrat-Lösung	F	+	30	50	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	-	+	+
Natriumsilikat-Lösung	F	+	30	50	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Natriumsulfat-Lösung	F	+	20	50	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Natriumvanadat-Lösg.	F	+	10	50	+	+	+	+	+	+						+	+	+	+	+	+		+	+
Neon	G	-	100	100	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+		+				+	+
Oleum	F	+	10	50	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-		+	-	-	+	-	-	+	+
Oleum	F	+	20	20	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-		+	-	-	+	-	-	+	+
Olivenöl	F	-		50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+		+	+	+	-	+	+
Oxalsäure-Lösung	F	+	10	50	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+		+	+	-	+	+
Ozon	G	-	10	20	+	+	+	+		+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	
Perchloräthylen	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+
Petroleum	F	-	100	20	+	+	+	+	+	+		+	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+
Phenol	F	-	90	50	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+
Phosgen	F	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-			-	+	+
Phosphorsäure	F	+	30	50	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+
Phosphorsäure	F	+	80	20	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+
Phtalsäureanhydrid	F	-		20	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+		-	+	+	+	+	+
Propan	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+				-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
Salpetersäure	F	+	20	40	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	+	+
Salpetersäure	F	+	70	50	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+
Salzsäure	F	+	10	50	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+
Salzsäure	F	+	37	20	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+
Salzsole	F	+		20	-	-	-	-	-	+	-	+	+			+	+	+	-	+		+	+	+
Sauerstoff	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+		+	+			+	+	+		+	-	-	+	+
Schwefeldioxid, trock.	G	-	100	50	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+		+	+	+		+	+	-	+	+
Schweflige Säure	F	+	10	20	+	+	-	+	-	+		+		+	-	+	+	+		+	+	+		
Schwefelsäure	F	+	10	50	-	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+
Schwefelsäure	F	+	50	20	-	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-		+	+	-	+	+
Schwefelsäure	F	+	96	20	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-		+	+	-	+	+
Schwefelwasserst., tr.	G	-	100	20	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	-	+	+
Spinnbad	F	+		50				+	+	-	-	+		-	-	+	+	-		+		-	+	+

	Gasförmig/Flüssig	Elektrische Leitfähigkeit	Konzentration (%)	Temperatur (°C)	Metalle									Nichtmetalle										
					1.4301	1.4539	1.4541	1.4571	Hasteloy B	Hasteloy C	Titan	Tantal	Platin	Hartgummi	Weichgummi	PFA	PTFE	EPDM	Buna N	Viton A	PVDF	PVC	Glas	Al_2O_3
Stickstoff	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	-	-	+	+
Tetrachlorkohlenstoff	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+		-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+
Toluol	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+				-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+
Trichloräthylen	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+
Trikresylphosphat	F		100	50	+	+	+	+	+	+				-	-	+	+		+	-	-	-	+	+
Vinylacetat	F		100	20	+			+	-	+				-	-	+	+	+		+	+	+	+	
Vinylchlorid	F		100	20		+		+	+	+		+	+	-	-	+	+		-	+			+	
Wasserstoff	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+		+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+
Wasserstoffperoxid-L.	F	+	40	20	+	+	+	+		+	-	+	-	-	-	+	+	+		+	+	-	+	
Weinsäure	F	+	20	50	-	-	-	-	+	+	+	+		+	+	+	+			+		+	+	+
Xylol	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+				-	-	+	+	-		-	+	-	+	+
Zinkchlorid-Lösung	F	+	60	20	-	-	-	-	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Zitronensäure	F	+	60	50				+	+	+	-	+	+		-	+	+	+		+	+	-	+	+

8 Quellenverzeichnis

DIN 1319	Grundbegriffe der Messtechnik
DIN ISO 6817	Durchflussmessung von leitfähigen Flüssigkeiten
DIN ISO 9104	Durchflussmessung von Fluiden
DIN 1952	Durchflussmessung mit Blenden, Düsen, Venturirohren
DIN 19559	Durchflussmessung von Abwasser in offenen Gerinnen und Freispiegelleitungen
VDE/VDI 3512	Durchflussmessungen mit Drosselgeräten, Messanordnungen
VDE/VDI 2040	Berechnungsgrundlagen für die Durchflussmessung mit Drosselgeräten
EN 60529	IP-Schutzarten
EN 29104	Verfahren zur Beurteilung des Betriebsverhaltens von magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräten
DIN VDE 0170/017	Bestimmung für explosiongeschützte elektrische Betriebsmittel
DIN VDE 0165	Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen
DIN EN 50014 bis 50020 und 50028	Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche
NAMUR NE 21	NAMUR-Empfehlung Elektro-magnetische Verträglichkeit
Eck, Bruno	„Technische Strömungslehre“ Springer-Verlag, Berlin
Hengstenberg, Sturm, Winkler	„Messen, Steuern, Regeln in der Chemischen Technik“ Springer-Verlag, Berlin
Kalide, Wolfgang	„Einführung in die technische Strömungslehre“ Carl Hauser Verlag, München
Naudascher, Eduard	„Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke“ Springer-Verlag, Wien, New York

Technisches Schrifttum der Firmen:
Aerzener Maschinenbaufabrik
Bopp und Reuther
Danfoss
Meinecke
Schoppe & Faeser
Sensycon
Siemens

Dechema-Werkstofftabelle: Dechema Frankfurt/Main

9 Sachwortverzeichnis

Die wichtigsten Verfahren der Mengen- und Durchflussmessung werden beschrieben und ihre Eigenschaften verglichen.

Eine Vielzahl praktischer Hinweise gibt dem Anwender umfassende und wertvolle Informationen rund um das Thema Durchflussmessung im industriellen Umfeld.



D184B075U01 Rev. 4/01.2006